

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Obor 2303V002 Strojírenská technologie

zaměření

Tváření kovů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Hodnocení mechanických vlastností nových vysokopevnostních materiálů

The Evaluation of Mechanical Properties of New High-strength Materials

Ing. Jiří Sobotka

Vedoucí katedry: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Školitel: doc. Ing. Mirko Král, CSc.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 166

Počet obrázků: 89

Počet tabulek: 68

Počet příloh: 4

Anotace

Téma práce: Hodnocení mechanických vlastností nových vysokopevnostních materiálů

Disertační práce se zabývá problematikou popsání specifického chování nového typu vysokopevnostního materiálu, který vykazuje tzv. **TWIP** (**T**Winning **I**nduced **P**lasticity) **efekt** – plasticita indukovaná dvojčatěním. Cílem práce je provést měření materiálových charakteristik tohoto materiálu s ohledem na různé podmínky měření, nalézt odpovídající koeficienty aproximačních křivek pro budoucí numerické simulace a zjistit diagramy mezních přetvoření (DMP). Disertační práce tak vytváří základní popis a charakteristiku tohoto zcela nového materiálu. Poskytuje tak nezbytné informace pro další testování a také pro jeho budoucí širší nasazení především ve strojírenském průmyslu. S ohledem na tuto skutečnost je velký prostor věnován možnostem optického měření deformace, které je schopné poskytnout hlubší informace o chování zkoumaného materiálu než běžné testovací metody. Jedná se tedy do určité míry o průkopnickou práci. Tato skutečnost však také přináší jistá omezení a to především s ohledem na počet vzorků, které lze použít pro vlastní měření. Výsledky práce poslouží jako podklad k dalšímu testování TWIP materiálu, mohou být použity při numerické simulaci tvářecích pochodů a v neposlední řadě obeznámí vědeckou veřejnost s novým materiálem, jeho omezeními a možnostmi z hlediska tváření kovů.

Klíčová slova: plastická deformace, dvojčatění, TWIP efekt, zpevnění, DMP

Subject of thesis: The Evaluation of Mechanical Properties of New High-strength Materials

The Doctoral Thesis describes the specific behavior of a new type of high-strength material, which displays a so called **TWIP** (**T**Winning **I**nduced **P**lasticity) **effect**. The aim is to measure the material characteristics of this material respecting the different conditions of measurement; to find the corresponding coefficients of approximation curves for future numerical simulation and to establish the Forming Limit Diagrams (FLD). The Doctoral Thesis thus brings a basic description and characteristics of this completely new material. Therefore it presents the necessary information for further testing and its future exploitation mainly in the engineering industry. Respecting these facts a wide attention is given to the possibilities of optical measurement of strains, which is capable to give us deeper information about the behavior of the tested material than the usual testing methods. This partly pioneering work on the other hand means certain restrictions, mainly in the number of specimens used for the testing itself. The results of the research work will be used as a starting point for further testing of TWIP materials and they may be used for the numerical simulation of deformation processes. Not in the least the scientific community will receive new information about a new material, its limitation and possibilities regarding metal forming.

Keywords: Plastic Deformation, Twinning, TWIP effect, Work Hardening, FLD

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval mému školiteli doc. Ing. Mirko Královi, CSc., za všestrannou pomoc a trpělivost v průběhu mého doktorského studia a cenné rady a připomínky, které velkou měrou pomohly k vypracování této disertační práce.

Rád bych také poděkoval celé Katedře strojírenské technologie za umožnění zpracování této disertační práce a kolegům za jejich podporu a pomoc. Jmenovitě bych rád poděkoval následujícím kolegům: Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D., Ing. Pavlu Doubkovi, Ph.D., Ing. Michaela Kolnerové, Ph.D., Ing. Karolíně Němečkové, Ing. Martinu Luňáčkovi, Ing. Janu Bočkovi, Ing. Jiřímu Bobkovi a pí Marcela Koutové. Poděkování také patří Ing. Marii Válové z Ústavu strojírenské technologie ČVUT v Praze a Ing. Janu Slámovi ze Škoda Auto a.s.

V neposlední řadě patří poděkování mým rodičům. Bez jejich umožnění vzdělávání na vysoké škole, dlouholetou trpělivost a podporu v průběhu celého tohoto studia bych toto vše nikdy nedokončil.

OBSAH

| | |
|---|----|
| Seznam použitých zkratk a symbolů | 7 |
| 1. Úvod | 11 |
| 2. Deformační chování materiálu | 14 |
| 2.1. Napětí | 14 |
| 2.2. Deformační chování tvářeného tělesa | 16 |
| 2.2.1. Plastická deformace | 19 |
| 3. Plastická deformace skluzem | 23 |
| 3.1. Geometrie skluzu (kritické skluzové napětí) | 25 |
| 3.2. Plastická deformace dvojčatěním | 30 |
| 3.2.1. Srovnání deformace skluzem a dvojčatěním | 32 |
| 3.2.2. Geometrie dvojčat (kritické napětí při dvojčatění) | 34 |
| 3.2.3. Poměrné prodloužení při dvojčatění | 36 |
| 3.2.4. Tvar dvojčat | 37 |
| 3.2.5. Napětí potřebné k dvojčatění | 38 |
| 3.2.6. Dvojčatění v HCP mřížce | 39 |
| 3.2.7. Dvojčatění v BCC mřížce | 43 |
| 3.2.8. Dvojčatění v FCC mřížce | 43 |
| 3.2.9. Základní aspekty procesu dvojčatění | 44 |
| 4. Zkoušky hodnocení pevnostních plechů | 46 |
| 4.1. Statická zkouška tahem | 46 |
| 4.1.1. Definice základních veličin | 48 |
| 4.1.2. Ukazatelé tvářitelnosti | 49 |
| 4.1.3. Anizotropie materiálu | 51 |
| 4.2. Diagramy mezních přetvoření | 52 |
| 4.2.1. Určování DMP početními metodami | 54 |
| 4.2.2. Určování DMP experimentálním způsobem | 55 |
| 4.2.3. Určování mezního stupně přetvoření | 57 |
| 4.3. Určování DMP za vyšších rychlostí deformace | 58 |
| 5. Sortiment plechů používaných pro karosářské výlisky | 60 |
| 5.1. Texturování pracovního válce | 61 |
| 5.2. Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem | 63 |
| 5.3. IF ocele bez intersticií (Interstitials Free) | 64 |

| | |
|--|-----|
| 5.4. IF ocele s BH efektem (Bake Hardening) | 64 |
| 5.4.1. BH ocele se zvýšeným obsahem C | 65 |
| 5.4.2. BH ocele se zvýšeným obsahem Ti resp. Nb..... | 65 |
| 5.5. Pevnostní plechy | 66 |
| 5.5.1. DP ocele (Dual Phase - dvoufázové ocele) | 66 |
| 5.5.2. CP ocele (Complex Phase – vícefázové ocele) | 67 |
| 5.5.3. MS ocele (Martensite Steels - martenzitické ocele) | 67 |
| 5.5.4. TRIP ocele (ocle s transformačně indukovanou plasticitou)..... | 68 |
| 5.6. Rozdělení materiálů používaných pro stavbu karoserie | 68 |
| 6. Ocele vykazující TWIP efekt | 69 |
| 6.1. Fyzikální modelování TWIP efektu | 73 |
| 6.2. Role manganu (Mn) na proces dvojčatění v TWIP materiálech | 75 |
| 6.3. Základní charakteristika manganu | 75 |
| 7. Metalografické laboratorní metody | 79 |
| 7.1. Světelná mikroskopie | 80 |
| 7.1.1. Světelná mikroskopie pro sledování dvojčatění | 81 |
| 7.2. Elektronová mikroskopie | 82 |
| 7.2.1. Transmisní elektronová mikroskopie (TEM)..... | 82 |
| 7.2.2. Řádkovací elektronová mikroskopie (SEM) | 84 |
| 7.2.3. Elektronová mikroskopie pro sledování dvojčatění | 84 |
| 7.3. Rentgenová mikroskopie..... | 85 |
| 8. Cíle experimentální části..... | 86 |
| 8.1. Charakteristika materiálu TWIP 1200..... | 87 |
| 8.2. Struktura materiálu TWIP 1200 | 88 |
| 9. Statická zkouška tahem | 90 |
| 9.1. Vliv rychlosti deformace na mechanické vlastnosti | 91 |
| 9.2. Sledování deformace pomocí optického systému | 100 |
| 9.3. Určení regresních koeficientů C a n | 104 |
| 9.4. Vliv teplotního cyklu na mechanické vlastnosti..... | 115 |
| 9.5. Dílčí závěr (statická zkouška tahem)..... | 124 |
| 10. Vliv technologie přípravy vzorků na následné materiálové vlastnosti..... | 126 |
| 11. Diagramy mezních přetvoření | 135 |
| 11.1. Podmínky zjišťování DMP | 136 |
| 11.2. Deformační síť na povrchu plechu | 138 |



| | | |
|---------|--|-----|
| 11.3. | Zpracování naměřených hodnot | 140 |
| 11.4. | DMP při rychlosti tažníku $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4}$ m/s | 142 |
| 11.4.1. | Rozložení deformace podél vzorku | 143 |
| 11.5. | DMP při rychlosti tažníku $v_2 = 17,78$ m/s | 148 |
| 11.6. | DMP při rychlosti tažníku $v_2 = 17,78$ m/s a předdeformaci 1/3..... | 149 |
| 11.7. | DMP při rychlosti tažníku $v_2 = 17,78$ m/s a předdeformaci 2/3..... | 152 |
| 11.8. | Srovnání DMP za všech podmínek měření..... | 153 |
| 11.9. | Dílčí závěr (DMP)..... | 154 |
| 12. | Diskuze výsledků disertační práce | 155 |
| 13. | Doporučení pro další výzkum..... | 158 |
| 14. | Závěr | 159 |
| 15. | Seznam použité literatury | 161 |
| 16. | Publikační činnost | 164 |
| 17. | Seznam příloh | 166 |

Disertační práce vznikla za podpory výkumného záměru **MŠM 4674788501** a **GAČR 101/07/P113**.

Seznam použitých zkratek a symbolů

| Označení | Rozměr | Význam |
|-----------------|-----------------|---|
| A | - | Franciosiho interakční skluzová matice |
| A,B,C | - | Regresní koeficienty polynomické křivky |
| A_0 | mm^2 | Plocha průřezu materiálu |
| A_g | % | Homogenní tažnost |
| A_{sr} | mm^2 | Plocha skluzové roviny |
| A_x | % | Tažnost |
| B | - | Interakční matice systémů skluz-dvojčatění |
| b, b_0 | mm | Aktuální a počáteční šířka vzorku |
| BCC | | Kubická prostorově centrovaná mřížka |
| BH | | Zvýšení meze kluzu při vypalování laku (B ake H ardening) |
| BH0 | | Teplotní cyklus |
| BH1 | | Teplotní cyklus + předdeformace ($\varepsilon = 1\%$) |
| BH5 | | Teplotní cyklus + předdeformace ($\varepsilon = 5\%$) |
| C | MPa | Modul monotónního zpevnění |
| CP | | Vícefázové ocele (C omplex P hase) |
| CRSS | MPa | Kritické smykové napětí (C ritical R esolved S hear S tress) |
| D | μm | Velikost zrna |
| dC | % | Přírůstek obsahu uhlíku |
| dCr | % | Přírůstek obsahu chrómu |
| dF | N | Přírůstek síly |
| dMn | % | Přírůstek obsahu manganu |
| DMP | | Diagramy mezních přetvoření |
| DP | | Dvoufázové ocele (D ual P hase) |
| dSFE | mJ/m^2 | Přírůstek energie vrstevné chyby |
| D_ε | - | Deviátor deformace |
| D_σ | MPa | Deviátor napětí |
| E | MPa | Modul pružnosti v tahu |
| EBT | | E lectron B eam T exturing |
| EDT | | E lectric D ischarge T exturing |
| e_j | μm | Průměrná tloušťka mikrodvojčat |
| EU | | Evropská unie |
| F | - | Celkový podíl dvojčat ve struktuře |
| FCC | | Kubická plošně centrovaná mřížka |
| F_n | N | Normálová složka síly |
| FP | | DMP zjišťovaný „za pomalu“ ($v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$) |

| Označení | Rozměr | Význam |
|---------------|--|--|
| FR | | DMP zjišťovaný „za rychla“ ($v_2 = 17,78$ m/s) |
| F_R | | Síla působící ve směru skluzu |
| FR13 | | DMP zjišťovaný „za rychla“ ($v_2 = 17,78$ m/s) a předdeformaci 1/3 |
| FR23 | | DMP zjišťovaný „za rychla“ ($v_2 = 17,78$ m/s) a předdeformaci 2/3 |
| F_t | N | Tangenciální (tečná) složka síly |
| G | MPa | Modul pružnosti ve smyku |
| GPFE | | Energie rovinné chyby (G eneralized P lanar F ault E nergy) |
| h | J·s | Planckova konstanta |
| HCP | | Hexagonální mřížka |
| IF | | Ocele bez intersticií (I nterstitials F ree) |
| $K_{1,2, 20}$ | | Referenční roviny při dvojčatění |
| KMP | | Křivka mezních přetvoření |
| KUT | - | Komplexní ukazatel tvárivosti |
| K_ϵ | - | Kulový tenzor deformace |
| K_σ | MPa | Kulový tenzor napětí |
| L | mm | Délka hrany krychle |
| $L_{01,02}$ | mm | Počáteční rozměry elementů deformační sítě |
| L_i, l_i | mm | Koncová délka měřeného vzorku |
| L_o, l_o | mm | Počáteční délka měřeného vzorku |
| LT | | L aser T exturing |
| MS | | Martenzitické ocele (M artensite S teels) |
| m_σ | - | Ukazatel stavu napjatosti |
| m_ϕ | - | Ukazatel stavu přetvoření |
| n | - | Exponent deformačního zpevnění |
| N | - | Počet měření |
| P | - | Podíl bodů zákl. souboru zahrnutého do tolerančních mezí |
| ρ | $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ | Hybnost elektronu |
| ppm | | Počet částic na 1 milion částic (P arts P er M illion) |
| PRETEX | | P REussag T EXturing |
| R | - | Koeficient spolehlivosti |
| R | MPa | Smluvní napětí |
| R_a | μm | Střední aritmetická drsnost |

| Označení | Rozměr | Význam |
|-----------------|----------|---|
| R_e | MPa | Výrazná mez kluzu |
| R_m | MPa | Mez pevnosti |
| $R_{p0,2}$ | MPa | Nevýrazná (smluvní) mez kluzu |
| $r_{stř}$ | - | Střední hodnota anizotropie |
| r_α | - | Normálové anizotropie |
| S | mm^2 | Plocha průřezu |
| S | | Velikost smyku při dvojčatění |
| s | - | Výběrová směrodatná odchylka |
| SBT | | S hot B last T exturing |
| SEM | | S canning E lectron M icroscopy |
| s_R | - | Reziduální směrodatná odchylka |
| S_α | mm^2 | Plocha svírající s plochou průřezu S úhel α |
| t | mm | Tloušťka zkušebního vzorku |
| T_1 | - | Jednotkový tenzor |
| TEM | | T ransmission E lectron M icroscopy |
| t_i | μm | Střední volná dráha (MFP) mezi mikrodvojčaty |
| TRIP | | T Ransformation Induced P lasticity |
| TWIP | | T Winning Induced P lasticity |
| T_ε | - | Tenzor deformace |
| T_σ | MPa | Tenzor napětí |
| u | mm | Prodloužení hrany krychle |
| U | kV | Urychlovací napětí |
| UH | - | Ukazatel hlubokotažnosti |
| ULSAB | | U ltra L ight S teel A uto B ody |
| v | mm | Kontrakce hrany krychle |
| $v_{c1,2,3}$ | m/s | Rychlost posunu příčnicku (deformace) |
| w | mm | Posuv protilehlých stran krychle |
| $W1$ | | Pracovní zpevnění při předdeformaci ($\varepsilon = 1\%$) |
| $W5$ | | Pracovní zpevnění při předdeformaci ($\varepsilon = 5\%$) |
| x_{max} | - | Maximum z naměřených hodnot |
| x_{min} | - | Minimum z naměřených hodnot |
| Z | % | Kontrakce |
| ZP | MPa | Zásoba plasticity |
| γ , SFE | mJ/m^2 | Energie vrstevné chyby (S tacking F ault E nergy) |

| Označení | Rozměr | Význam |
|-----------------------------------|-----------------|--|
| Δr | - | Plošná anizotropie |
| Λ , MFP | μm | Stř. volná dráha dislokací (M ean F ree P ath of Dislocations) |
| \square | - | Aritmetický průměr |
| α | $^\circ$ | Úhel sklonu plochy |
| β | $^\circ$ | Úhel tvaru dvojčete |
| γ | - | Smyková deformace |
| ε | - | Poměrné prodloužení |
| η | - | Koeficient útlumu |
| $\eta_{1,2}$ | | Směry smyku při dvojčatění |
| Θ | $^\circ$ | Úhel skosení |
| λ | $^\circ$ | Úhel mezi napětím a směrem skluzu |
| λ | nm | Vlnová délka |
| μ | - | Součinitel příčné deformace |
| ρ_j | m^{-2} | Hustota dislokací |
| σ | MPa | Skutečné (normálové) napětí |
| σ_i | MPa | Intenzita napětí |
| σ_{okt} | MPa | Normálné oktaedrické napětí |
| σ_s | MPa | Střední napětí |
| τ | MPa | Smykové napětí |
| τ_{krit} | MPa | Kritické skluzové napětí |
| τ_{max} | MPa | Maximální smykové napětí |
| $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ | MPa | Složky smykového napětí |
| φ | - | Skutečné (logaritmické) přetvoření |
| φ_0 | - | Posunutí křivky zpevnění |
| φ_1 | - | Hlavní (M ajor) přetvoření |
| φ_2 | - | Vedlejší (M inor) přetvoření |
| φ_i | - | Intenzita přetvoření |
| $\dot{\varphi}$ | s^{-1} | Rychlost deformace |
| χ_0 | $^\circ$ | Úhel mezi skluzovou rovinou a směrem namáhání před plastickou deformací |
| χ_i | $^\circ$ | Úhel mezi skluzovou rovinou a směrem namáhání po plastické deformaci |
| ψ | - | Poměrné zúžení |
| Φ | $^\circ$ | Úhel mezi osou válce a normálou ke skluzové rovině |

1. Úvod

Evropa se začíná stále více zelenat. Nejedná se pouze o čisté konstatování ohledně stavu životního prostředí na starém kontinentě, ale týká se také určitého pronikání základních principů a myšlenek ohledně **enviromentální politiky**. Slouží jistě ke cti zástupcům evropských zemí sdružených v Evropské unii, že jako jedni z prvních na celé naší modré planetě začali důsledněji prosazovat ochranu životního prostředí na všech úrovních evropské politiky.

Ve svém důsledku se tato skutečnost však nejvíce týká strojírenského průmyslu, který se musí dynamicky přizpůsobovat požadavkům, jenž pochází většinou z rukou odborníků (někdy bohužel také různých lobistů a jiných zájmových skupin) sídlících v Bruselu. Takovéto splňování mnohdy náročných podmínek na samotnou výrobu tedy neustále nutí představitele strojírenských firem hledat a vyvíjet nové přístupy a technologie, které jsou více a více šetrnější k životnímu prostředí.

Kromě nátlaku ze strany EU však existuje další velmi silná skutečnost, která kontinuálně přispívá k rozvoji nových (k životnímu prostředí více vhodných) technologií a používaných materiálů. Jedná se o velmi silnou závislost lidstva na fosilních palivech – konkrétně na ropě. Tato surovina, která je základem veškeré moderní civilizace, začíná postupně docházet a lidstvo je tak nuceno nacházet buď zcela nové zdroje energie (tzv. **obnovitelné zdroje energie**, jako jsou např. sluneční záření, větrná a vodní energie nebo energie biomasy) a nebo používat takové technologie a zařízení, které vykazují menší spotřebu ropných produktů. Obecně lze v současné době říci, že hlavní poptávka je po takových technologiích a materiálech, které dokáží buď snížit energetickou náročnost nebo naopak zvýšit účinnost přeměny jednotlivých druhů energií [1].

Jestliže jsou pak výsledky takovéto snahy nasazeny do výrobního procesu, jejich přínos a využití velmi silně souvisí s počtem výrobků, kde je takováto technologie nebo materiál použit. Tato skutečnost se velice úzce týká zejména **automobilového průmyslu**, který je v současné době i v České republice hlavní ekonomickou silou. Snížení spotřeby automobilu souvisí s velkým počtem aspektů, které se na spalování pohonných hmot podílejí. Jedná se např. o energetickou účinnost motoru automobilu nebo tribologické aspekty jeho pohybu. V této práci se však zaměříme na samotnou hmotnost automobilu a to konkrétně na jeho vlastní skelet – tedy **karoserii**.



Obr. 1.1. Karoserie automobilu

Na obr. 1.1. je vidět karoserie automobilu bez pohledových dílů. Jelikož tato část tvoří až 30% celkové hmotnosti automobilu [2], je patrné, že **redukce hmotnosti** výrazně snižuje spotřebu pohonných hmot. Je-li k dispozici jenom jeden materiál, redukce jeho hmotnosti spočívá ve snížení jeho rozměrů. Ve většině případů se jedná o změnu tloušťky materiálu. Tím se sice sníží hmotnost karoserie a přeneseně tedy i spotřeba pohonných hmot, velmi negativně tato změna však ovlivní **bezpečnost pasažérů** automobilu. Zde je tedy velkou snahou neustále zvyšovat bezpečnost cestujících. K dosažení tohoto cíle je totiž nezbytné použít naopak materiál o větší tloušťce nebo vyšší pevnosti, což však vede ke zvyšování hmotnosti karoserie a tedy také k nárůstu spotřeby pohonných hmot. V této oblasti tak existuje velmi silný antagonismus těchto dvou základních požadavků (snížování hmotnosti karoserie a zvyšování bezpečnosti cestujících). Nejedná se však o jediné nároky na karoserii automobilu. Používané materiály musí splňovat mnoho dalších aspektů nasazení do výrobního procesu. Zde se jedná např. o technologickou zpracovatelnost, životnost vyrobených dílů, jejich funkčnost apod. Z hlediska sortimentu používaných materiálů a jejich kombinací urazil automobilový průmysl dlouhou a náročnou cestu. V současnosti se pro stavbu karoserie běžně používají slitiny na bázi hliníku, polymerní materiály (plasty) nebo kompozitní materiály. Nosným prvkem pro samotnou karoserii však neustále zůstávají ocelové plechy.

V rámci udržení této skutečnosti a lepší konkurenceschopnosti vůči novým materiálům (především polymerům a kompozitním materiálům) přední světoví výrobci plechů jako např. Salzgitter Stahl nebo ArcelorMittal založili společný projekt známý jako **ULSAB**. Tento projekt si klade za cíl vyvíjet takové materiály, které vyhovují podmínkám pro snižování hmotnosti karoserie a zároveň svými pevnostními charakteristikami zvyšují bezpečnost pasažérů.

I díky této spolupráci (netýká se však pouze materiálů, ale např. i nových metod tváření výlisků) byl vyvinut zcela nový druh materiálu, který vykazuje tzv. **TWIP efekt** (**TW**innig **I**nduced **P**lasticity) – tedy plasticita indukovaná dvojčatěním. Obecně lze říci, že základem chování tohoto materiálu je rozvoj plastické deformace dvojčatěním. Označení TWIP se potom používá na celou velkou skupinu materiálů, jejichž základem je rozvoj plastických deformací pomocí dvojčatění.

Předkládaná disertační práce hodnotí tvářitelnost tohoto materiálu. Snahou je podat širší veřejnosti základní aspekty chování testovaného materiálu a vymezit hranice použitelnosti z hlediska tváření kovů. S ohledem na tuto skutečnost je také provedeno jeho testování. Vzhledem k velmi **specifickým vlastnostem** zkoumaného materiálu je však také třeba vypracovat metodiku měření nejenom jeho materiálových charakteristik, ale také metodiku určování diagramů mezních přetvoření za různých podmínek testování. K popsání velmi charakteristického chování materiálu vykazujícího tzv. TWIP efekt je v současné době výhodné použít moderní možnosti sledování deformace materiálu pomocí **optických měřících systémů**. Jejich použití a zpracování výsledků je jedním z hlavních aspektů disertační práce. Základní oblasti zaměření předkládané práce představují:

- Popsání materiálu vykazujícího TWIP efekt a jeho charakteristika, jelikož se jedná o zcela nový materiál.
- Proměření jeho základních materiálových charakteristik, především s ohledem na plastickou deformaci a budoucí numerické simulace.
- Vliv rychlosti deformace na vlastnosti materiálu.
- Vliv podmínek testování na vlastnosti materiálu.
- Určení diagramů mezních přetvoření při různých podmínkách testování.
- Možnosti použití optických metod snímání deformace k bližšímu popsání specifického chování materiálu.
- Doporučení pro další výzkum v této oblasti.

2. Deformační chování materiálu

Tato kapitola pojednává o chování materiálu při mechanickém namáhání. Je však nejprve nutné si uvědomit, že materiál jako takový nelze mechanicky namáhat. Z materiálu musíme nejprve vyrobit těleso (strojní součást, konstrukční díl,...) a to je poté podrobena mechanickému namáhání. Chování tohoto tělesa za daných podmínek namáhání pak tedy velmi závisí i na tvaru a rozměrech sledovaného tělesa. Základní veličiny, používané k popisu deformačního chování materiálu, jsou napětí a deformace.

2.1. Napětí

Lze říci, že napětí v namáhaném tělese představuje míru vnitřních sil, které vznikají v tělese jako důsledek pružné deformace vyvolané vnějšími silami, které na těleso působí. Pro případ, že rozložení síly F na plochu S je rovnoměrné, je napětí dáno vztahem:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1)$$

kde σ je napětí [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$].

Pro naprostou většinu inženýrských aplikací je však tato jednotka příliš malá a z tohoto důvodu je používanou jednotkou pro napětí meganewton na čtvereční metr nebo megapascal [$\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$ nebo častěji MPa].

V namáhaném tělese mohou potom existovat dva druhy napětí:

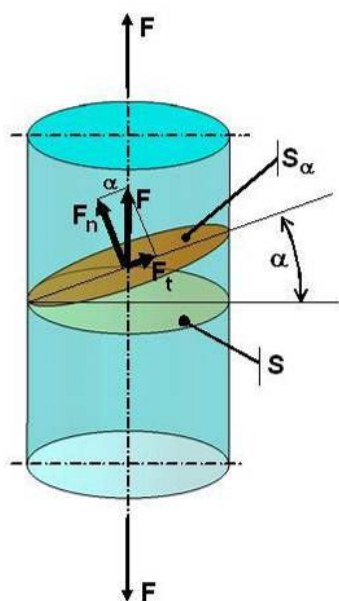
- **normálové napětí σ** působící kolmo na plochu průřezu,
- **smykové napětí τ** působící v rovině plochy průřezu.

Reakcí materiálu na deformaci není pouze jediné napětí. Rozdělení druhů a velikostí napětí i jejich směrů v zatíženém tělese potom označujeme pojmem napjatost (stav napětí). Obecně lze rozdělit napjatost do následujících hlavních skupin stavu napětí:

- **jednoosý** tah nebo tlak - např. tahové zatížení ve zkušebním tělese během zkoušky tahem nebo tlakové zatížení sloupu podpírajícího např. klenbu kostela),
- **dvouosý tah** - rovinná napjatost – např. ve stěně nafouknutého balónku, kde stěna balónku je zatížena ve dvou směrech,
- **trojosá napjatost** -např. hydrostatický tlak působící na povrch ryb žijících v hlubinách oceánů,
- **čistý smyk** - např. ve stěně kroucené tenkostěnné trubky [3].

Pro nejjednodušší případ stavu napjatosti (jednoosý tah) platí pro výpočet napětí následující vzorec. Na obr. 2.1. je nakresleno těleso válcovitého tvaru namáhané silou F působící v ose válce. V průřezu o ploše S kolmém k ose tyče považujeme napětí za rovnoměrně rozložené, a proto normálové osově napětí má tvar:

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (2)$$



V průřezu o ploše S_α , který svírá s průřezem S libovolný úhel α menší než 90° , se potom síla F rozkládá na dvě složky - normálovou F_n a tangenciální (tečnou) F_t , pro které platí:

$$F_n = F \cdot \cos \alpha \quad (3)$$

$$F_t = F \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

Odpovídající normálové napětí σ_α a smykové tečné napětí τ_α lze vyjádřit jako:

$$\sigma_\alpha = \frac{F_n}{S_\alpha} = \frac{F \cdot \cos \alpha}{S} = \frac{F}{S} \cos^2 \alpha = \sigma \cos^2 \alpha \quad (5)$$

$$\tau_\alpha = \frac{F_t}{S_\alpha} = \frac{F \cdot \sin \alpha}{S} = \frac{F}{S} \sin \alpha \cos \alpha = \sigma \sin \alpha \cos \alpha \quad (6)$$

Obr. 2.1. Schéma tahového
zatížení válcové tyče

Ze vztahu (6) je patrné, že smykové napětí dosahuje maximální hodnoty je-li úhel $\alpha = 45^\circ$.

2.2. Deformační chování tvářeného tělesa

Deformaci lze pozorovat pouhým okem (na rozdíl od napětí) a můžeme ji tedy přímo měřit. Obecně lze označit za míru deformace posuv jednotlivých bodů tělesa oproti sousedním bodům a s tím spojenou i změnu tvaru. Obdobně jako u napětí rozeznáváme tahové a smykové napětí, také zde specifikujeme i druhy deformací jako tahovou a smykovou.

Představíme si uvnitř válcového tělesa z obr. 2.1. krychličku o hraně délky L . Vzhledem ke směru napětí je krychlička orientována podle obr. 2.1. Při zatížení dojde k prodloužení hrany krychličky délky L o hodnotu u a **poměrné prodloužení** ε je potom dána vztahem:

$$\varepsilon = \frac{u}{L} \quad [-] \text{ popř. } [\%] \quad (7)$$

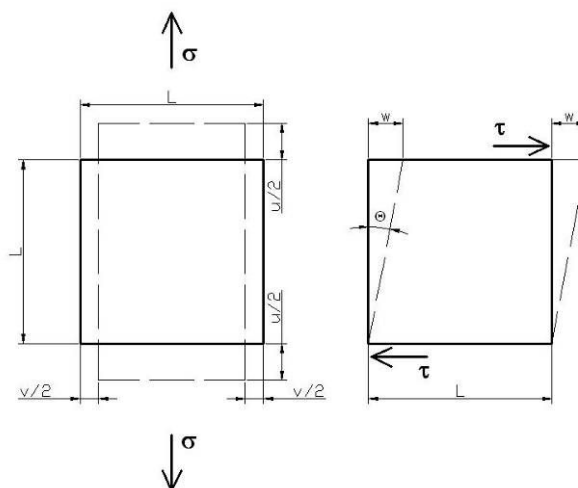
Ve směru kolmém na působící napětí dochází ke kontrakci (zužování) rozměrů krychličky o délku v . Tuto deformaci označujeme jako **poměrné zúžení** ψ :

$$\psi = \frac{v}{L} \quad [-] \text{ popř. } [\%] \quad (8)$$

Vztah mezi tahovou deformací a zúžením je **součinitel příčné deformace** μ (Poissonův poměr): $\mu = -\frac{\psi}{\varepsilon} \quad [-]$ (9)

Smyková deformace γ je potom určena jako posuv protilehlých stran krychličky w a úhlu skosení Θ (pro malé deformace platí $\gamma = \Theta$) a je dána vztahem:

$$\gamma = \frac{w}{L} = \tan \Theta \quad [-] \text{ popř. } [\%] \quad (10)$$



Obr. 2.2. Definice poměrných deformací ε , ψ a γ

V nauce o pružnosti a pevnosti se počítá s účinkem vnějších sil na tvarové a rozměrové změny tělesa. Pohybujeme se však v oblasti tzv. **elastické** (vratné nebo pružné) **deformace**. Těleso je tedy v tomto případě zatěžováno tak, že je jeho deformace vratná a po odlehčení vymizí (těleso nabývá původní tvar a objem). Takovýto typ deformace umožňuje relativně malý posun atomů kolem jejich rovnovážných poloh v krystalové mřížce. Protože průběh výsledné síly působící na atomy v bezprostředním okolí rovnovážné polohy v krystalové mřížce je možno aproximovat přímkovou závislostí, lze tedy i závislost mezi napětím a deformací krystalických látek aproximovat pomocí přímky. Konstanty úměrnosti v těchto závislostech jsou materiálové charakteristiky – moduly pružnosti.

V případě tahového napětí a poměrné deformace platí **Hookův zákon**:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (11)$$

kde E [MPa] je modul pružnosti v tahu (Youngův modul).

Mezi smykovým napětím a smykovou deformací platí vztah:

$$\tau = G \cdot \gamma, \quad (12)$$

kde G [MPa] je modul pružnosti ve smyku.

Při elastické deformaci je nutné brát v úvahu skutečnost, že dochází ke změně mřížkových parametrů, což má za následek změnu objemu materiálu. Je tedy nezbytné brát v úvahu i Poissonův poměr. Pro většinu kovů je však $\mu = 0,33$ a lze tedy říci, že nejčastější měřenou materiálovou charakteristikou pro elastické chování materiálu je modul pružnosti v tahu E .

Pro ideálně elastické chování materiálu je typická lineární závislost σ – ε , kde sklon přímky (stejný pro tah i tlak) udává modul pružnosti E . Plocha pod křivkou závislosti σ – ε pak vyjadřuje množství elastické **energie** w akumulované v jednotce objemu materiálu zatíženého napětím σ .

$$w = \int_0^{\varepsilon} \sigma \cdot d\varepsilon = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (13)$$

Při odlehčení se akumulovaná energie uvolní.

V reálných materiálech při opakovaném zatěžování dochází k velmi malému posunu mezi napětím a deformací. Tento posuv způsobí vznik hysterezí smyčky. Plocha hysterezí smyčky je dána vztahem:

$$\Delta w = \oint \sigma \cdot d\varepsilon, \quad (14)$$

kde Δw představuje disipovanou energii (rozptýlenou) v materiálu při jednom zátěžovém cyklu.

Tento jev se nazývá **anelasticita** a materiálová vlastnost, která způsobuje anelastické chování, se jmenuje vnitřní pnutí. Mírou vnitřního útlumu je koeficient útlumu η .

$$\eta = \frac{\Delta w}{w} \quad (15)$$

Mechanismy vzniku anelastického chování materiálu se zpravidla rozdělují do dvou hlavních skupin [3]: teplotně a frekvenčně závislé vnitřní tlumení a na teplotě a frekvenci nezávislé vnitřní tlumení.

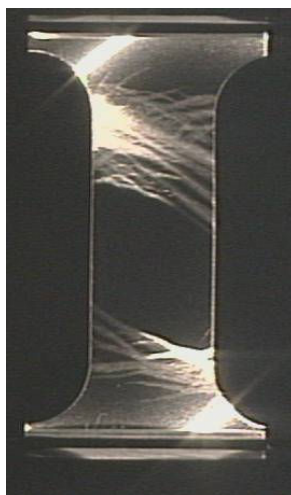
- **Teplotně a frekvenčně závislé vnitřní tlumení** se uplatňuje pouze při určité frekvenci a teplotě zatěžování. Za těchto podmínek dochází k výraznému nárůstu koeficientu útlumu η . Jedná se o procesy, kdy část pružné deformace se během namáhání mění na nevratnou deformaci, což způsobuje relaxaci napětí – dopružování (pružiny, šrouby apod.) a nebo vyvolává nežádoucí změnu rozměrů součástí po tepelném zpracování.
- **Teplotně a frekvenčně nezávislé vnitřní tlumení** souvisí s disipací (rozptylem) elastické energie při vibracích v širokém rozmezí teplot. Jedná se např. o zvony tradičně vyráběné z mosazi. V případě velice čistých kovů, kde ve struktuře jsou volné dislokace, dochází ke ztrátám energie v důsledku vratného pohybu dislokací.

Běžné stavební materiály (např. beton) také výrazně rozptylují energii kmitů, protože jsou plné trhlinek, pórů a nehomogenit. Velmi významné materiály (z hlediska schopnosti tlumit vibrace) jsou polymerní materiály - plasty. Zde dochází při jejich zatěžování ke „klouzání“ molekul, což způsobí poměrně velké energetické ztráty. Platí, že snadnost „klouzání“ molekul závisí na poměru provozní teploty T vůči teplotě skelného přechodu T_g daného plastu.

2.2.1. Plastická deformace

U všech pevných materiálů má velikost elastické deformace jistou mez (mez elasticity). Za touto mezí již dochází v materiálu k trvalým tvarovým změnám, případně ke vzniku trhlin. Plastická deformace kovů je tedy charakterizována trvalými rozměrovými změnami. Při konstantním rozměru jsou tyto změny tím větší, čím větší je stupeň deformace. V některých případech dochází k vybočování a vzájemnému přesouvání celých částí povrchu (bloku) po sobě a naopak jiné části se zdánlivě do hmoty materiálu propadají. Na řezu plasticky deformovaného kovu lze již v makroskopickém měřítku pozorovat po vhodném naleptání řadu vzájemně se křížících čar. Jedná se o tzv. Lüdersovy (Černovovy) obrazce a svědčí o změnách, které vznikly na ploškách s maximálním smykovým napětím τ_{\max} , které svírá s působící silou úhel 45° (viz obr. 2.3.).

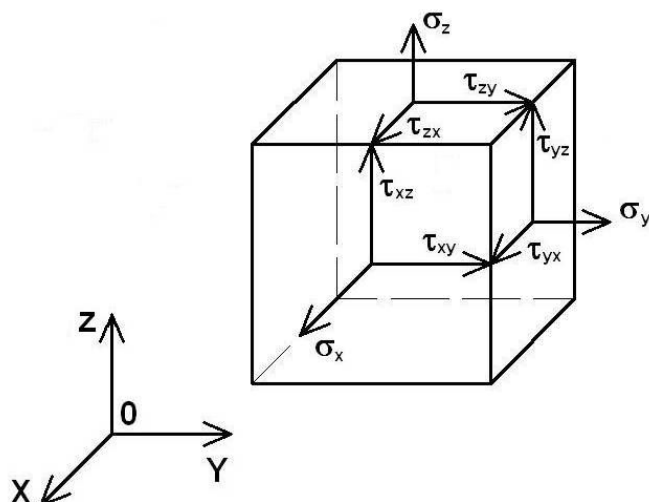
Přesně definovat hranici mezi elastickou a plastickou oblastí prakticky nelze. Lze však za tuto mez považovat napětí, pod kterým je elastická deformace zanedbatelná a nad kterým je plastická deformace mnohem větší než elastická. Po překročení příslušného napětí (meze kluzu) nastává plastická deformace, která probíhá pomocí dvou základních procesů – **skluzem** nebo **dvojčatěním**. Ve stručnosti lze říci, že během skluzu se pohybuje horní část krystalu nad spodní částí podél určitých krystalografických rovin (skluzové roviny). Při tomto procesu se atomy posunou o celý počet mřížkových vektorů. Během dvojčatění se naopak atomy neposouvají o celé mřížkové vektory, ale v každé rovině se přemístí o stejnou vzdálenost vzhledem k atomům v sousedních rovinách (jsou v dvojčatové orientaci).



Obr. 2.3. Lüdersovy (Černovovy) obrazce deformovaného materiálu

Plastická deformace je tedy charakteristická nevratností děje a za normálních teplot se vysvětluje pomocí poruch krystalické mřížky. Jedná se především o tzv. čárové poruchy (dislokace), které se mohou pohybovat, čímž zaujímají atomy v mřížce nové polohy. Dochází tak k trvalému vzájemnému posunutí vrstev atomů, kdy se převážná část energie (až 85%) přemění v teplo.

Z hlediska působení silových účinků na tvářené těleso se ukazuje jako velmi vhodné zavést tenzorové vyjádření stavu napjatosti, které tento silový účinek vyvolá. Obecný stav napjatosti je zobrazen na obr. 2.4. a k popsání tohoto stavu je třeba tří složek normálových napětí a šesti složek tangenciálních napětí. Pro popis obecného stavu napjatosti je tedy třeba více než tří údajů a je nezbytné použít maticového počtu. Takovéto veličiny se posléze označují jako veličiny tenzorové. Konkrétně stav napjatosti je tenzorem druhého řádu, jelikož $3^2 = 9$.



Obr. 2.4. Znázornění obecného stavu napjatosti

Na obr. 2.4. je znázorněn určitý element tělesa (zde krychle), kde zkoumáme stav napjatosti. Normálová napětí působí jako tah nebo tlak kolmo na stěnách krychle, tangenciální (smyková) napětí působí ve stěnách krychle a mají směr kolmý k jejím hranám. První index označuje rovinu, v níž tangenciální napětí působí. Jedná se o označení směru osy kolmé na uvažovanou stěnu krychle. Druhý index označuje směr tangenciálního napětí. Dle zákona sdružených smykových napětí pak platí, že:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad (16)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (17)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (18)$$

Tenzor napětí lze v tomto souřadnicovém systému napsat ve tvaru:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (19)$$

Tenzor hlavních napětí představuje stav napjatosti vyjádřený pouze hlavními normálními napětími:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad (20)$$

Pro další matematické zkoumání plastických deformací a jejich převedení na jednoduché výrazy se ukazuje jako velmi vhodné převést tyto veličiny na plochu pravidelného oktaedru. Nejde však pouze o matematické výrazy, ale o veličiny, které mají též svůj fyzikální význam (např. všestranný hydrostatický tlak kapalin). **Normální oktaedrické napětí** σ_{okt} , které působí kolmo k rovině oktaedru, se totiž svým matematickým vyjádřením rovná průměrné hodnotě složek normálních napětí ve směru souřadných os. Je-li tedy stav napjatosti určen pouze pomocí tenzoru hlavních napětí (20), vytíná rovina oktaedru na souřadných osách σ_1 , σ_2 a σ_3 stejně velké úseky [4] a normála N této roviny poté svírá se souřadnými osami stejně velké směrové úhly $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$. Jelikož platí, že:

$$\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2 + \cos^2 \alpha_3 = 1 \quad (21)$$

Je velikost kosinu směrového úhlu:

$$|\cos \alpha| = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (22)$$

Pro velikost normálního oktaedrického napětí lze tedy napsat:

$$\sigma_{\text{okt}} = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \cos^2 \alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (23)$$

Normální oktaedrické napětí můžeme označit také jako **střední napětí** σ_s . V tenzorovém symbolice se systém veličin o stejné velikosti a smyslu označuje jako tzv. kulový tenzor [5].

Kulový tenzor napětí K_{σ} potom tedy bude:

$$K_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_s & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_s & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_s \end{pmatrix} \quad (24)$$

Kulový tenzor K_σ rozložíme na součin **jednotkového tenzoru** T_1 a skalární veličiny σ , která je rovna oktaedrickému napětí. Její znaménko přitom určuje vektor tenzorovou symbolikou znázorněný jako jednotkový tenzor:

$$T_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (25)$$

Kulový tenzor K_σ lze tedy vyjádřit jako:

$$K_\sigma = \sigma \cdot T_1 \quad (26)$$

Druhou složkou, která je sice opět vektorem, ale má již v jednotlivých směrech X,Y,Z různou velikost a smysl, je tzv. **deviátor**. Tenzorové znázornění takovýchto složek potom podává **deviátor napětí** D_σ :

$$D_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x - \sigma_s & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_s & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_s \end{pmatrix} \quad (27)$$

Pomocí kulového tenzoru napětí K_σ a deviátoru napětí D_σ jsou vyjádřeny obě složky, na které lze obecně rozložit vektor normálových napětí. Obecně si tento rozklad můžeme představit jako napjatost v bodě tělesa rozloženou na napjatost způsobující změnu objemu a změnu tvaru. **Tenzor napětí** T_σ lze následně vyjádřit jakou součet kulového tenzoru napětí K_σ a deviátoru napětí D_σ :

$$T_\sigma = K_\sigma + D_\sigma = \sigma \cdot T_1 + D_\sigma \quad (28)$$

Pomocí takto zavedeného tenzorového vyjádření stavu napjatosti lze posléze vyjádřit a spočítat další velmi důležité body ohledně plastického přetvoření zkoumaného tělesa – např. hlavní napětí σ_i nebo poměrné oktaedrické napětí σ^0 . Při rozboru deformace lze opět **tenzor deformace** T_ϵ rozložit na **kulový tenzor deformace** K_ϵ a **deviátor deformace** D_ϵ , kdy opět můžeme napsat:

$$T_\epsilon = K_\epsilon + D_\epsilon = \epsilon_s \cdot T_1 + D_\epsilon \quad (29)$$

Domnívám se však, že hlubší matematické popsání plastické deformace je nad rámec zaměření této práce, která si klade za hlavní cíl obeznámit vědeckou veřejnost se základním chováním materiálu vykazujícího tzv. **TWIP efekt**.

3. Plastická deformace skluzem

Jak již bylo zmíněno, skluz dislokací je základním mechanismem plastického přetvoření kovů. Nutnou podmínkou je, aby působící vnější napětí uvedlo dislokace do pohybu a aby jejich pohyb pokračoval v průběhu plastického přetvoření. Lze tedy říci, že plastická deformace v krystalu nastává vzájemným pohybem jednotlivých lamel (vrstev) krystalu ležících nad sebou. Tento pohyb se soustřeďuje do řady rovin, zatímco bloky mezi nimi zůstávají nedeformovány (vše si lze jednoduše představit jako deformace balíčku karet).

K pochopení samotné podstaty plastické deformace skluzem je důležité použít výsledků dosažených na monokrystalech, protože výsledky získané na polykrystalech udávají průměrné chování všech rozdílně orientovaných zrn. Vlastní posunutí nastává podél krystalografické roviny, kterou potom nazýváme **rovinou skluzu** a v krystalografickém směru, tzv. **směru skluzu**. Skluz se potom řídí třemi zákony [6]:

1. směr skluzu je vždy totožný se směrem nejhustěji obsazeným atomy,
2. skluz většinou nastává v nejhustěji obsazených rovinách,
3. z dané skupiny rovin a směrů je činný ten skluzový systém (rovina a směr), kde má skluzové napětí největší hodnotu.

Důležitost těchto zákonů pro proces plastické deformace (ale i např. pro pochopení procesů deformačního zpevnění nebo přednostní orientace – textur) je výrazná, a proto byly především v druhé polovině 20. století předmětem rozsáhlého výzkumu. Platnost výše uvedených zákonů je možno si ověřit z chování kovů s kubickou plošně centrovanou mřížkou (**FCC - face-centered-cubic**), kde skluz probíhá ve směrech $\langle 110 \rangle$ v rovinách $\{111\}$. Kovy s kubickou prostorově centrovanou mřížkou (**BCC - body-centered-cubic**) mají směr nejtěsnějšího uspořádání $\langle 111 \rangle$ v rovinách $\{110\}$. Stejně tak může však skluz nastat v rovinách $\{112\}$ nebo $\{123\}$. Pro materiály s hexagonální těsně uspořádanou mřížkou (**HCP – hexagonal close-packed**) pak skluz probíhá ve směrech $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ jelikož tento směr je nejhustěji obsazen atomy [7]. Aktivní skluzová rovina však závisí na hodnotě poměru os. Pro ideální hodnotu poměru $c/a = 1,633$ je bazická rovina také rovinou skluzovou. Pro poměr os menší než je ideální hodnota však bazická rovina není nejhustěji

obsazenou rovinou a pozorují se proto jiné skluzové roviny. Zde se jedná např. o Zr ($c/a = 1,593$) nebo Ti ($c/a = 1,587$). Pro **Mg** platí poměr $c/a = 1,623$ (tedy přibližně roven ideální hodnotě) a za pokojové teploty se pozoruje skluz pouze na bazické rovině, avšak při teplotách nad 250°C dochází ke skluzu také v rovinách $\{10\bar{1}1\}$. Ostatní roviny se tedy mohou stát aktivními při vyšších teplotách, jde však též o roviny s poměrně vysokou hustotou atomů. Je zřejmé, že rovina skluzu v kterékoli mřížce je tedy především ovlivněna teplotou a chemickým složením. Směr skluzu však není tak nestálý. V tab. 3.1. je potom podán přehled směrů a rovin skluzu, které se uplatňují při plastické deformaci pro základní kovy [6].

Tab. 3.1. Hlavní směry a roviny skluzu pro vybrané kovy (nízké teploty)

| Struktura | Kov | Rovina skluzu | Směr skluzu |
|---|----------------------|------------------|------------------------------|
| FCC (kubická plošně centrovaná) | Al | $\{111\}$ | $\langle 10\bar{1} \rangle$ |
| | Cu | $\{111\}$ | $\langle 10\bar{1} \rangle$ |
| | Ag | $\{111\}$ | $\langle 10\bar{1} \rangle$ |
| | Au | $\{111\}$ | $\langle 10\bar{1} \rangle$ |
| | Ni | $\{111\}$ | $\langle 10\bar{1} \rangle$ |
| | Cu-Au | $\{111\}$ | $\langle 10\bar{1} \rangle$ |
| | α -Cu-Zn | $\{111\}$ | $\langle 10\bar{1} \rangle$ |
| | α -Cu-Al | $\{111\}$ | $\langle 10\bar{1} \rangle$ |
| | Al-Cu | $\{111\}$ | $\langle 10\bar{1} \rangle$ |
| | Al-Zn | $\{111\}$ | $\langle 10\bar{1} \rangle$ |
| BCC (kubická prostorově centrovaná) | α -Fe | $\{110\}$ | $\langle 111 \rangle$ |
| | | $\{112\}$ | $\langle 111 \rangle$ |
| | | $\{123\}$ | $\langle 111 \rangle$ |
| | Mo | $\{112\}$ | $\langle 111 \rangle$ |
| | W | $\{112\}$ | $\langle 111 \rangle$ |
| | K | $\{123\}$ | $\langle 111 \rangle$ |
| | Na | $\{112\}$ | $\langle 111 \rangle$ |
| HCP (hexagonální těsně uspořádaná) | Be ($c/a = 1,568$) | $\{0001\}$ | $\langle 2\bar{1}10 \rangle$ |
| | Ti ($c/a = 1,587$) | $\{10\bar{1}0\}$ | $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ |
| | Zr ($c/a = 1,593$) | $\{10\bar{1}0\}$ | $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ |
| | Mg ($c/a = 1,623$) | $\{0001\}$ | $\langle 2\bar{1}10 \rangle$ |
| | Co ($c/a = 1,623$) | $\{0001\}$ | $\langle 2\bar{1}10 \rangle$ |
| | Zn ($c/a = 1,856$) | $\{0001\}$ | $\langle 2\bar{1}10 \rangle$ |
| | Cd ($c/a = 1,886$) | $\{0001\}$ | $\langle 2\bar{1}10 \rangle$ |

3.1. Geometrie skluzu (kritické skluzové napětí)

Lze celkem dobře definovat počátek plastické deformace v krystalu jako napětí, které na nastávající skluzové rovině a směru skluzu dosáhne kritické hodnoty. Při této hodnotě se krystal začne plasticky deformovat znatelnou rychlostí. Jestliže je napětí menší, potom je rychlost deformace velice malá a je třeba dlouho trvajících pokusů, aby ji bylo možno měřit. Pakliže se plastická deformace nachází v této oblasti, nazýváme ji tečením (creep). V okolí kritického napětí rychlost deformace roste a lze ji měřit. Takovýto typ plastické deformace se obvykle nazývá již zmíněným skluzem. U různě orientovaných krystalů daného kovu začíná skluz za různých napětí působících na jeho průřez, ale složka napětí v rovině skluzu a ve směru skluzu je vždy stejná a označuje se jako kritické skluzové napětí [8].

Na obr. 3.1. můžeme vidět, že plocha skluzové roviny A_{sr} je dána jako:

$$A_{sr} = \frac{A_0}{\cos \phi} \quad (30)$$

kde: A_0 - plocha průřezu materiálu,
 ϕ - úhel mezi osou válce a normálou ke skluzové rovině.

Platí tedy, že na jednotku skluzové roviny působí síla F_R , které má směr skluzu.

$$F_R = F \cos \lambda \quad (31)$$

kde: F - působící síla ve směru osy válce,
 λ - úhel mezi napětím σ a směrem skluzu.

Výsledné smykové napětí ve směru skluzu je tedy potom výsledkem předchozích rovnic.

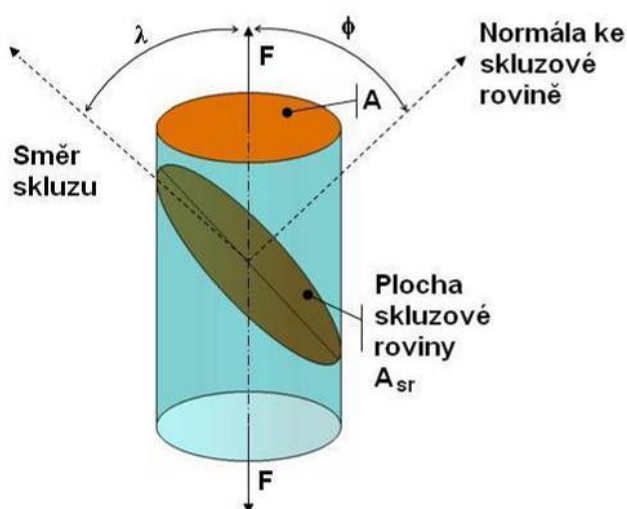
$$\tau_{krit} = \frac{F}{A_0} \cos \phi \cos \lambda \quad (32)$$

Součin $\cos \phi \cos \lambda$ bývá označován jako tzv. Schmidův index. Plastická deformace tedy nastává, když smykové napětí dosáhne kritického skluzového napětí τ_{krit} . Tuto hodnotu představuje mez kluzu pro daný materiál. Je patrné, že plastická deformace nastane ve skluzových systémech mající největší Schmidův index. Z toho vyplývá, že pro případ, kdy je k dispozici pouze několik skluzových systémů (jako např. pro Zn nebo Cd), napětí potřebné k dosažení plastické deformace bude velmi záviset na daném Schmidově faktoru a jeho hodnota se tak bude velmi lišit pro různé orientace skluzového systému. Ukázka průběhu kritického skluzového napětí v závislosti na

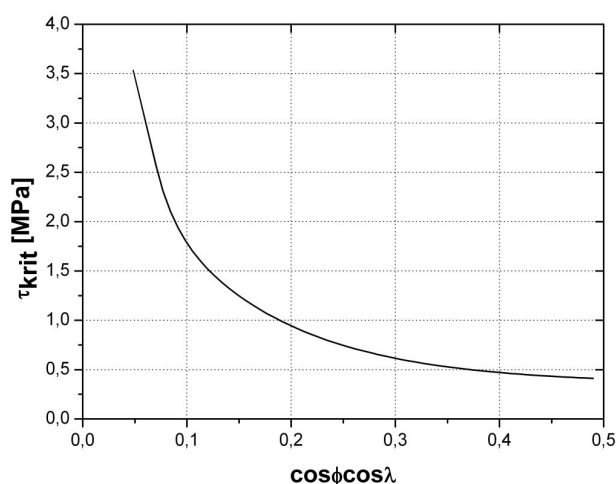
orientaci monokrystalu Zn je potom ukázána na obr. 3.2. Normálové napětí vůči rovině skluzu se potom vypočítá jako:

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0} \cos^2 \phi. \quad (33)$$

Normálové napětí vyvolává oddálení atomů ve směru normály skluzové roviny, zatímco smyková složka vyvolává posun těchto atomů vůči sobě. Velikost σ_n může být také velmi rozdílná, ale bez ovlivnění počátku plastické deformace. Např. pro Cd bylo zjištěno, že velikost τ_{krit} se pohybovala v mezích 2% pro všechny orientace krystalu, zatímco velikost σ_n kolísala až v 20-ti násobné změně. Normálová složka napětí však neovlivňuje samotný skluz (jak bylo dokázáno experimentálním měřením). Platí zde tedy zákon, že v různých krystalech vyvolává skluz konstantní skluzové napětí. Hodnoty kritického skluzového napětí τ_{krit} pro vybrané kovy [6] jsou posléze uvedeny v tab. 3.2. a jedná se o kritické napětí za teploty 20°C.



Obr. 3.1. Orientace skluzové roviny a směru skluzu vůči směru zatěžování



Obr. 3.2. Průběh kritického skluzového napětí v závislosti na orientaci monokrystalů Zn

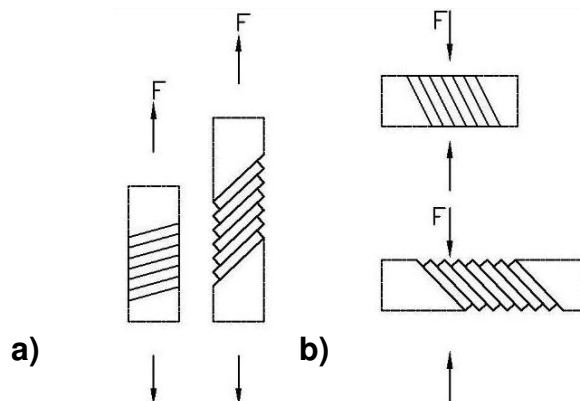
Tab. 3.2. Kritické skluzové napětí τ_{krit} pro vybrané kovy ($T = 20^\circ\text{C}$)

| Kov | Obsah nečistot [%] | Rovina skluzu | Směr skluzu | τ_{krit} [MPa] |
|-----|--------------------|---------------|------------------------------|---------------------|
| Cu | 0,1 | {111} | $\langle 10\bar{1} \rangle$ | 1,0 |
| Ag | 0,01 | {111} | $\langle 10\bar{1} \rangle$ | 0,6 |
| Au | 0,01 | {111} | $\langle 10\bar{1} \rangle$ | 0,92 |
| Ni | 0,2 | {111} | $\langle 10\bar{1} \rangle$ | 5,8 |
| Mg | 0,05 | {0001} | $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ | 0,83 |
| Zn | 0,04 | {0001} | $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ | 0,94 |
| Cd | 0,004 | {0001} | $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ | 0,58 |

Vidíme, že hodnota kritického skluzového napětí je ze všech čistých kovů nízká a poměrně značně se liší od hodnoty teoretické. Tento podstatný rozdíl vysvětluje teorie dislokací, která ukazuje, že k plastické deformaci skluzem dochází pohybem dislokací mřížkou v aktivní skluzové rovině. Na základě měření je zřejmé, že hodnota kritického skluzového napětí je závislá na řadě vnitřních i vnějších okolností [9] a bude se měnit zejména v závislosti na následujících faktorech.

- **Čistota kovů** – jedná se o velmi významný vliv na velikost kritického skluzového napětí a platí, že hodnota τ_{krit} je tím nižší, čím je čistota kovů vyšší. Přísady, které tvoří tuhé roztoky, zvyšují τ_{krit} intenzivněji než ty, které jsou nerozpustné. Obecně tedy platí, že vliv nečistot na plastické vlastnosti je velmi pronikavý a často nečistoty v setinách až tisícinách procenta mohou podstatně snížit plastičnost. Vhodnou výrobní metodou lze tedy výrazně ovlivnit plasticitu daného kovu.
- **Teplota** – tento vliv lze formulovat tak, že s rostoucí teplotou se snižuje hodnota τ_{krit} , přičemž klesne na nulu v bodě tání (na teplotě solidu u slitin). U některých kovů není vliv teploty tak jednoznačný, protože za různé teploty mohou být v činnosti různé aktivní skluzové roviny. To lze velice dobře dokumentovat např. u hliníku, který za normální teploty má jeden systém činných skluzových rovin. Se snižováním teploty se následně zvětšuje počet činných skluzových rovin, což se projevuje rychlým zvyšováním kritického skluzového napětí.
- **Mechanické či tepelné zpracování** apod.

Uvažujme nyní, co se děje se sklonem skluzové roviny, je-li krystal podroben plastické deformaci. Ke změně sklonu skluzové roviny vzhledem ke směru působícího hlavního napětí dochází v průběhu postupujícího skluzu [10]. V případě, že skluzu vznikají pouze v jednom směru a v jedné soustavě skluzových rovin, platí obecně, že při namáhání tahem se stáčí skluzové roviny a směry skluzu postupně do směru působící síly (viz obr 3.3.). Při namáhání tlakem se stáčí skluzové roviny a směry postupně do polohy kolmé ke směru působící síly (viz obr 3.3.).



Obr. 3.3. Změna orientace skluzových rovin pro
a) tahová namáhání **b)** tlaková namáhání

V případě pevně upnutého vzorku pro tahové namáhání je tedy proces plastické deformace ztěžován a vedle prostého skluzu se v některých místech objevuje také ohyb skluzových rovin se značnou distorzí atomové mřížky. Takovýto typ je potom naznačen na obr 3.4. Na stejném obrázku je potom ukázán případ tahového namáhání bez omezení pohybu jednotlivých segmentů krystalu po sobě a to bez rotace skluzových rovin. Tento typ si lze poměrně dobře představit jako rozbalení balíčku karet na stole. Jestliže je však vzorek upnut (např. do čelistí trhacího stroje), skluzové roviny jsou nuceny k rotaci v rozmezí úhlů $\chi_i \leq \chi_0$. Je patrné, že změna orientace skluzových rovin se bude velmi lišit v závislosti na poloze v měřeném tahově namáhaném vzorku podle vztahu:

$$\frac{L_i}{L_0} = \frac{\sin \chi_0}{\sin \chi_i} \quad (34)$$

kde: L_0, L_i - počáteční a koncová délka měřeného vzorku,

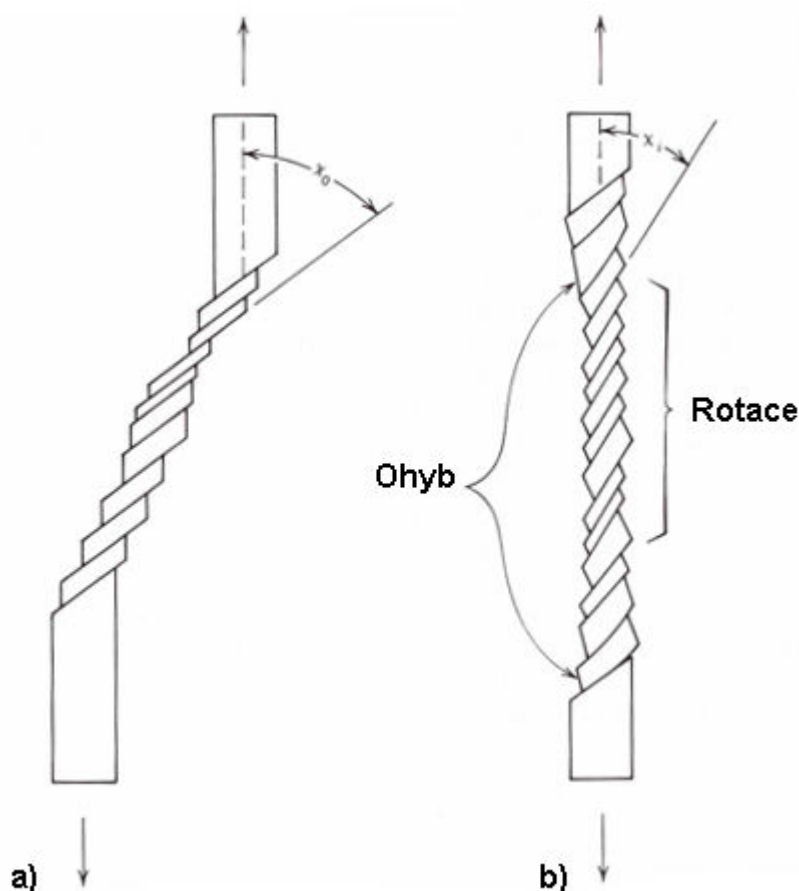
χ_0, χ_i - úhel mezi skluzovou rovinou a směrem namáhání před a po plastické deformaci vzorku.

Pakliže se jedná o rovinné vektory, potom platí $\chi' + \varphi = 90^\circ$. Z výzkumů, které provedli Schmidt a Boas, kde $\chi_0 = \lambda_0$, se nechá smyková deformace γ pro dané prodloužení měřeného vzorku spočítat jako:

$$\gamma = \frac{1}{\sin \chi_0} \left\{ \left[\left(\frac{L_i}{L_0} \right)^2 - \sin^2 \lambda_0 \right]^{\frac{1}{2}} - \cos \lambda_0 \right\} \quad (35)$$

V této rovnici je tedy γ určeno pomocí původní orientace skluzových elementů a velikosti prodloužení vzorku. Navíc rovnice (35) platí pouze v případě, kdy je aktivní pouze jeden skluzový systém, protože mnohonásobný skluz v sobě zahrnuje neurčitelné množství krystalové rotace od každého aktivního skluzového systému. Výsledné smykové napětí lze potom spočítat jako:

$$\tau = \frac{F}{A_0} \sin \chi_0 \left[1 - \frac{\sin^2 \lambda_0}{(L_i / L_0)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (36)$$

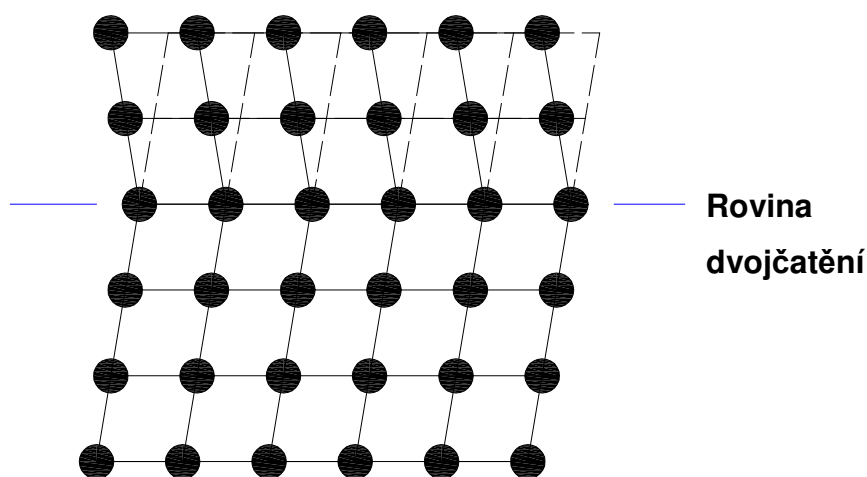


Obr. 3.4. Orientace skluzových rovin [7]

a) volný pohyb segmentů **b)** vzorek pevně upnutý (např. v čelistech)

3.2. Plastická deformace dvojčatěním

Plastická deformace prostým skluzem může být za určitých okolností doprovázena plastickou deformací dvojčatěním, při níž vznikají krystalická dvojčata. Deformační dvojčatění je tedy velmi důležitým mechanismem plastické deformace v mnoha kovech – záleží na vzájemných smykových pohybech atomových rovin. Zdvojení krystalu je vlastně náhlé přeskupení krystalové mřížky některé části krystalu. Nová mřížka má pravidelné uspořádání stejného druhu jako mřížka původní. Je však symetricky přetvořena vzhledem k původní rovině. Obě mřížky jsou tedy zrcadlově symetrické k rovině, která se označuje jako rovina dvojčatění [11]. Schématicky znázorněná plastická deformace dvojčatěním je na obr. 3.5.



Obr. 3.5. Plastická deformace dvojčatěním

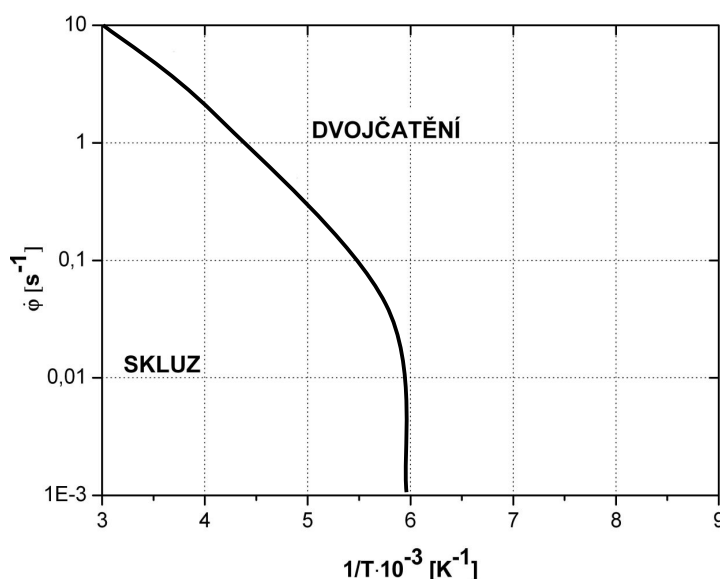
O krystalu tedy říkáme, že obsahuje dvojčata, je-li složen z částí, jež mají určitou vzájemnou orientaci. Dvojčata se v krystalu tvoří buď při deformaci a nebo při růstu krystalu za jistých podmínek. Orientace dvojčete je tedy buď zrcadlový obraz matečného krystalu na rovině dvojčatění (obr. 3.5.) a nebo jde o orientaci vzniklou ze základní polohy rotací kolem osy dvojčatění. Dvojčata s orientací odvozenou rotací se obvykle dají odvodit pomocí zrcadlení.

Při určování struktury je poměrně důležité užívat struktury krystalů bez dvojčat, protože provádí-li krystalograf goniometrická měření na krystalu obsahujícím dvojčata, může usoudit, že krystal patří do oddělení s vyšší symetrií než jakou má ve skutečnosti [12].

Při tvoření dvojčat za deformace se objevují velmi rychle tenké lamely, jejichž šířka se zvětšuje s rostoucím napětím rovnoměrným pohybem rozhraní dvojčete. Tento čočkovitý (jehlicovitý) tvar není charakteristický pouze pro dvojčata, ale také pro martenzitické transformace, při nichž dochází k podobnému smyku nebo k distorzi obdobné smyku. Nová dvojčata se obvykle objevují náhle, což někdy bývá doprovázeno akustickou vlnou (cvaknutí, praskání – až výsledný souvislý praskot). Tento jev naznačuje, že se jedná o přetržitý proces [6].

Ačkoliv se většina kovů obvykle nedeformuje dvojčatěním, lze je vyvolat při vhodných podmínkách. Posuv při dvojčatění musí probíhat pohybem dislokací, přičemž napětí způsobující dvojčatění bude záviset nejen na napětí dislokačního zdroje (jako v případě skluzu), ale také na povrchovém napětí hranice dvojčat. Napětí potřebné k dvojčatění je tedy obvykle vyšší než je napětí skluzové. Při pokojové teplotě tedy proběhne deformace vždy spíše skluzem než dvojčatěním. Budeme-li snižovat teplotu, při které deformace probíhá, bude růst kritické skluzové napětí. Celkové napětí bude vysoké a nastane větší pravděpodobnost, že deformace proběhne dvojčatěním. Tvorba dvojčat je tedy ovlivněna teplotou a také rychlostí zatěžování. Vzájemný vztah mezi teplotou, rychlostí zatěžování a vznikem dvojčatění je ukázán na obr. 3.6.

V železe a jeho slitinách nastává dvojčatění za pokojové teploty při rázu. Za nižších teplot při pomalejší deformaci se utvoří úzké lamely známé jako Neumannovy pásy. Jejich šířka je malá, ale lze je poměrně dobře pozorovat. Nejsou podobné skluzovým čarám a nápadně se objevují po leštění a leptání.

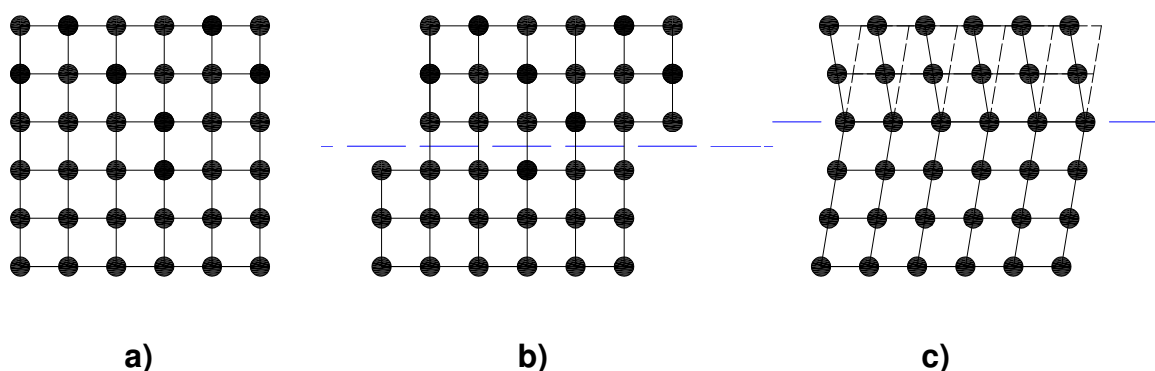


Obr. 3.6. Závislost průběhu plastické deformace na teplotě a rychlosti zatěžování

3.2.1. Srovnání deformace skluzem a dvojčatěním

Při srovnání plastické deformace skluzem a dvojčatěním je zřejmé, že největší rozdíl lze nalézt v samotné změně tvaru vyplývajícího z mechanismu těchto deformací. Zatímco skluz zahrnuje jednoduchý posun podél skluzové roviny, kde se jedna část materiálu posouvá vůči druhé, v průběhu dvojčatění se materiál podrobuje změně tvaru v důsledku naklopení jedné části materiálu vůči druhé. Lze tedy říci, že deformační dvojčatění je oblast v krystalu daného materiálu, která prodělala homogenní změnu tvaru a to takovým způsobem, že výsledná struktura je identická s mateřskou, ale rozdílně orientována.

Jak je vidět na obr. 3.7., změna tvaru pomocí krystalického dvojčete vyplývá z pohybu atomů, který se koná ve všech rovinách v určitém poměrném množství uvnitř dvojčete. Pro plastickou deformaci skluzem je pohyb dislokací a výsledné vícenásobné posunutí určité části materiálu oproti druhé dáno pomocí burgesova vektoru posunutí. Oproti tomu posunutí v jakékoliv rovině v dvojčeti je přímo úměrné vůči vzdálenosti od roviny dvojčatění. Při bližším zkoumání těchto posunutí dvojčatěním v prosté kubické mřížce bylo objeveno, že proces dvojčatění je ovlivněn natočením mřížky a to tak, že pozice atomů v dvojčeti představují zrcadlový obraz oproti pozicím atomů v nezdvojčatěném materiálu. Oproti tomu ke skluzu dochází translací podél poměrně vzdálené roviny pomocí vícenásobného posunutí burgesova vektoru posunutí. Vzájemná orientace různých oblastí v materiálu po deformaci skluzem tedy zůstává nezměněna.



Obr. 3.7. Plastická deformace mřížky

a) nepřetvořená mřížka **b)** deformace skluzem **c)** deformace dvojčatěním

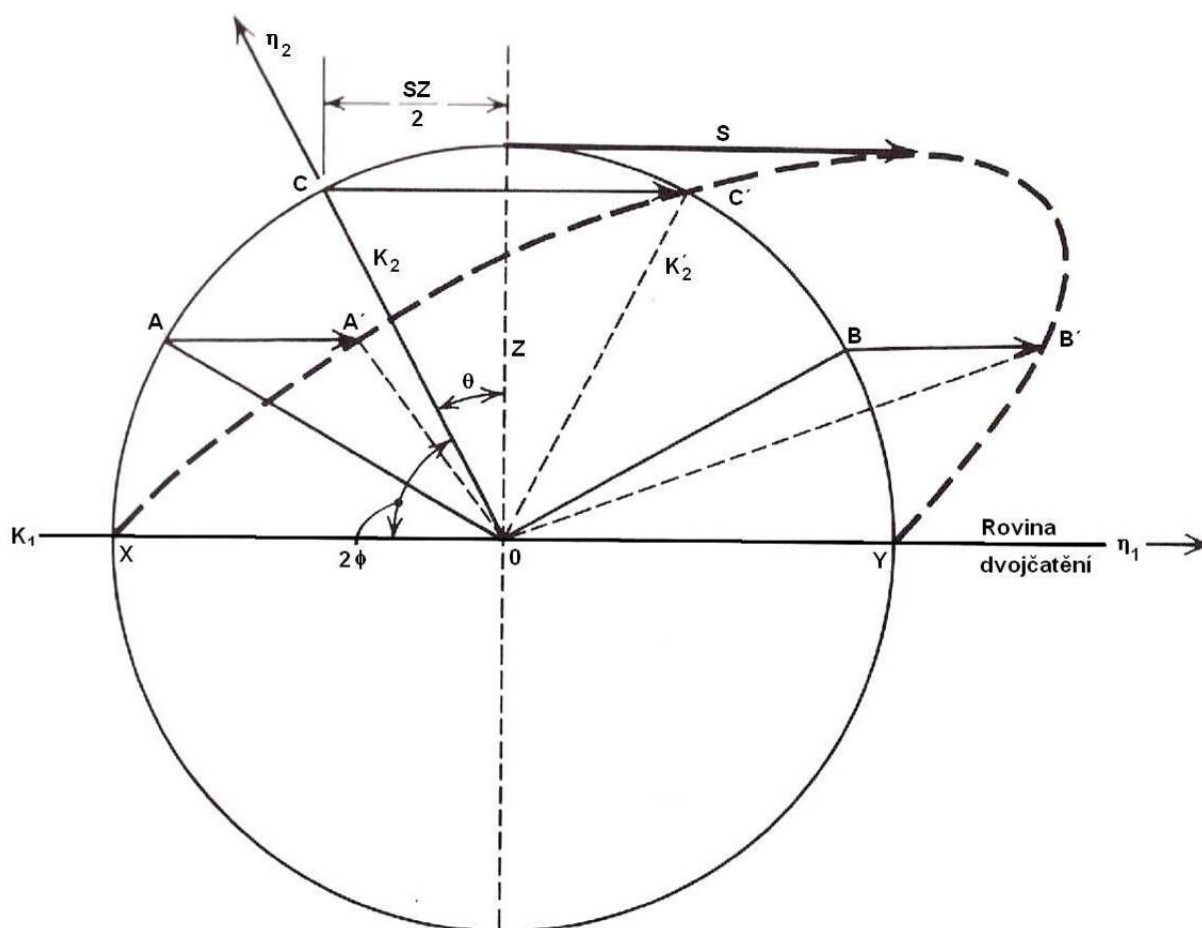
Rozdíly spojené s těmito různými druhy deformace materiálu se objevují např. již při samotném zkoumání deformačního povrchu leštěného vzorku [13]. Posuv díky deformaci skluzem lze pozorovat jako přímé nebo zvlněné čáry (v závislosti na energii vrstevné chyby materiálu - **SFE**) bez změny kontrastu v rovině skluzu. Deformace dvojčatěním se však projeví jako změna v kontrastu, protože je spojena se změnou mřížkové orientace uvnitř dvojčete, což způsobuje jiný odraz světla vůči objektivu čočky mikroskopu.

Před dalším popisováním plastické deformace dvojčatěním je nutné rozlišit mezi deformačním dvojčatěním a žíhacími dvojčaty. Obecně lze říci, že deformační dvojčatění v materiálu je výsledkem plastické deformace, zatímco žíhací dvojčata se ustavují během rekrystalizace a růstu nových zrn. Tedy během žíhacího procesu a předchází tak plastické deformaci.

Žíhací dvojčata jsou patrná v mikrostruktuře většiny vyžíhaných kovů s kubickou plošně centrovanou mřížkou a slitin jako mnoho rovných pásů, které probíhají napříč zrny. Tyto pásy mají dvojčatovou orientaci vzhledem k okolním částem zrna. Rovnoběžné části jejich hranic obvykle souvisí s rovinou dvojčatění {111}. Podobně jako při vzniku deformačních dvojčat i zde je k jejich vzniku potřeba pouze změny v uspořádání atomových rovin. Během vzniku nového uspořádání krystalu za žíhacího procesu může dojít k vytvoření chyby v poloze pravidelného uspořádání (jako vrstevná chyba) a vytvoří se první vrstva dvojčete. Jakmile dojde ke vzniku rozhraní dvojčat, může dojít k dalšímu růstu při změněném pořadí rovin. Např. chyba v následném uspořádání rovin – ABCABCBACBA – vede ke vzniku rozhraní dvojčete. Takovéto uspořádání zakládá energii vrstevné chyby (BCB). Bez předchozí existence vrstevné chyby v původních zrnech je pravděpodobnost vzniku žíhacích dvojčat poměrně malá. Při podobné chybě v uspořádání se nemění počet nejbližších sousedů, takže rozhraní dvojčete vznikne tím snadněji, čím nižší je energie vrstevné chyby. Je-li tedy hodnota energie vrstevné chyby vysoká (např. pro hliník), dochází k tvorbě žíhacích dvojčat zřídka. Naopak např. pro mosaz, která má nízkou energii vrstevné chyby, je vznik žíhacích dvojčat poměrně častým jevem. Protože pravděpodobnost vzniku vrstevné chyby také závisí na velikosti deformace, počet žíhacích dvojčat v daném materiálu se zvyšuje s předchozím tvářením za studena. Počet žíhacích dvojčat v rekrystalizovaném materiálu může tedy sloužit jako jistý průvodce ohledně deformační historie materiálu. U litých kovů se žíhací dvojčata vyskytují velmi zřídka, neboť během lití je pohyb hranic zrn zanedbatelný [12].

3.2.2. Geometrie dvojčat (kritické napětí při dvojčatění)

Samotná existence kritického smykového napětí při dvojčatění byla předpokládána řadu let, ale až v 50. letech byla experimentálně prokázána u kadmia. Schmid a Wassermann analyzovali změnu tvaru krystalu k níž dochází během dvojčatění. Na obr. 3.8. je znázorněna geometrie tvorby dvojčat jako referenční koule, která se přetvoří na elipsoid. Je třeba uvažovat dvě důležité referenční roviny, které jediné jsou při dvojčatění neporušeny. Tzn. roviny, v nichž se vepsané kružnice nezmění. Jednou z nich je rovina dvojčatění nebo skluzu K_1 , která obsahuje směr skluzu η_1 . Druhou neporušenou rovinou po dvojčatění je K_2 (K_{20} před dvojčatěním). Obě potom svírají úhel, jenž je určen velikostí smyku S . Smyk je tedy definován jako vzdálenost S , o níž se posune bod ležící v jednotkové vzdálenosti od roviny K_1 .



Obr. 3.8. Homogenní smyk při dvojčatění. Nedeformované roviny K_1 (rovina dvojčatění) a K_2 jsou kolmé k nákresně a odděleny úhlem 2Φ [7]

Předpokládejme nyní růst dvojčete v horní polovině referenční koule, kde znázorňujeme růst krystalu. Jakýkoli bod této koule bude posunut ze souřadnic X, Y, Z do souřadnic X', Y' a Z' . Platí, že $X = X', Z = Z'$ a $Y' = Y + SZ$. Jelikož S představuje velikost smyku, je vidno, že smykové posunutí jakékoli roviny je přímo úměrné její vzdálenosti od roviny dvojčatění. Tedy rovnice pro přetvořenou kouli je následující:

$$X'^2 + Y'^2 + Z'^2 = 1 = X^2 + Y^2 + 2SZY + S^2Z^2 + Z^2 = 1, \quad (37)$$

nebo

$$X^2 + Y^2 + 2SZY + Z^2(S^2 + 1) = 1, \quad (38)$$

která definuje kvadratický povrch.

V našem případě se vytvoří elipsoid, jehož hlavní osa je nakloněna od směru η_1 o úhel Φ . Z obr. 3.8. je patrné, že většina rovin obsažených uvnitř koule je buď zkrácena nebo prodloužena. Předpokládejme např. pohyb bodů A a B , které jsou mechanismem deformačního dvojčatění přeneseny do bodů označených jako A' a B' . Jestliže AO a BO představuje stopy těchto dvou rozdílných rovin, pak je zřejmé, že AO bylo zkráceno ($AO \rightarrow A'O$), zatímco BO bylo prodlouženo ($BO \rightarrow B'O$). Jak již bylo napsáno výše, pouze dvě roviny zůstávají nedeformované. První z nich je rovina dvojčatění K_1 (směr smyku je označen jako η_1). Druhou je potom rovina označena jako K_2 (její stopa je OC) a pro tuto rovinu platí, že $OC = OC'$. Směr η_2 je potom definován jako průsečík roviny K_2 a roviny smyku (roviny papíru). Konečná pozice této roviny je potom označena jako K_{20} . Platí tedy, že všechny roviny umístěné mezi body X a C budou zkráceny, zatímco všechny roviny umístěné mezi body C a Y budou prodlouženy. Typické hodnoty K_1 , K_2 , η_1 a η_2 jsou potom uvedeny v tab. 3.3. a dále popsány v dalších kapitolách. Jestliže hodnoty K_1 a η_2 jsou v poměru a hodnoty K_2 a η_1 nejsou, nazýváme potom takové dvojče dvojčetem prvního druhu. Pakliže hodnoty K_2 a η_1 jsou v poměru a hodnoty K_1 a η_2 nejsou, jedná se o dvojče druhého typu. Jestliže všechny elementy jsou v poměru, dvojče se potom označuje jako složené. Objevuje se často v krystalech majících vysokou symetrii, což platí pro většinu kovů. Velikost smyku S je dána pomocí úhlu 2Φ mezi rovinami K_1 a K_2 jako:

$$2\phi + \varphi = 90^\circ \quad (39)$$

$$\cot g 2\phi = \frac{S}{2} \quad (40)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\frac{SZ}{2}}{Z} = \frac{S}{2} \quad (41)$$

Tab. 3.3. Hodnoty veličin K_1 , K_2 , η_1 a η_2 pro vybrané kovy [7]

| Kov | Krystalová struktura | poměr c/a | K_1 | K_2 | η_1 | η_2 |
|--------------|----------------------|-----------|------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|
| Be | HCP | 1,568 | $\{10\bar{1}2\}$ | $\{\bar{1}012\}$ | $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ | $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ |
| Ti | HCP | 1,587 | $\{10\bar{1}2\}$ | $\{\bar{1}012\}$ | $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ | $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ |
| | | | $\{11\bar{2}1\}$ | $\{0001\}$ | $\langle 11\bar{2}6 \rangle$ | $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ |
| | | | $\{11\bar{2}2\}$ | $\{11\bar{2}4\}$ | $\langle 11\bar{2}3 \rangle$ | $\langle 22\bar{4}3 \rangle$ |
| Zr | HCP | 1,589 | $\{10\bar{1}2\}$ | $\{\bar{1}012\}$ | $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ | $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ |
| | | | $\{11\bar{2}1\}$ | $\{0001\}$ | $\langle 11\bar{2}6 \rangle$ | $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ |
| | | | $\{11\bar{2}2\}$ | $\{11\bar{2}4\}$ | $\langle 11\bar{2}3 \rangle$ | $\langle 22\bar{4}3 \rangle$ |
| Mg | HCP | 1,624 | $\{10\bar{1}2\}$ | $\{\bar{1}012\}$ | $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ | $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ |
| | | | $\{11\bar{2}1\}$ | $\{0001\}$ | $\langle 11\bar{2}6 \rangle$ | $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ |
| Zn | HCP | 1,856 | $\{10\bar{1}2\}$ | $\{\bar{1}012\}$ | $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ | $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ |
| Cd | HCP | 1,886 | $\{10\bar{1}2\}$ | $\{\bar{1}012\}$ | $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ | $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ |
| Al | FCC | - | $\{111\}$ | $\{11\bar{1}\}$ | $\langle 11\bar{2} \rangle$ | $\langle 112 \rangle$ |
| Au | FCC | - | $\{111\}$ | $\{11\bar{1}\}$ | $\langle 11\bar{2} \rangle$ | $\langle 112 \rangle$ |
| Ag | FCC | - | $\{111\}$ | $\{11\bar{1}\}$ | $\langle 11\bar{2} \rangle$ | $\langle 112 \rangle$ |
| Cu | FCC | - | $\{111\}$ | $\{11\bar{1}\}$ | $\langle 11\bar{2} \rangle$ | $\langle 112 \rangle$ |
| Ni | FCC | - | $\{111\}$ | $\{11\bar{1}\}$ | $\langle 11\bar{2} \rangle$ | $\langle 112 \rangle$ |
| γ -Fe | FCC | - | $\{111\}$ | $\{11\bar{1}\}$ | $\langle 11\bar{2} \rangle$ | $\langle 112 \rangle$ |
| α -Fe | BCC | - | $\{112\}$ | $\{\bar{1}\bar{1}2\}$ | $\langle \bar{1}11 \rangle$ | $\langle 112 \rangle$ |

3.2.3. Poměrné prodloužení při dvojčatění

Hall dokázal, že celkové prodloužení od zcela zdvojeného krystalu lze očekávat ve tvaru:

$$\frac{l}{l_0} = [1 + S \lg \kappa]^{\frac{1}{2}} \quad (42)$$

$$\lg \kappa = \frac{S \pm \sqrt{S^2 + 4}}{2} \quad (43)$$

kde: l_0, l - počáteční a koncová délka.

Pomocí rovnice (42) je spočítáno maximální poměrné prodloužení vybraných kovů. Spolu s velikostí smyku S je potom uvedeno v tab. 3.4. Je vidět, že se jedná o poměrně malé hodnoty a to obzvláště v případě HCP krystalů pro rovinu $\{10\bar{1}2\}$. Dvojčatění přispívá poměrně málo k celkovému prodloužení vzorku, natočení krystalu uvnitř dvojčete však slouží hlavně ke změně orientace skluzových rovin a výsledně se tedy může krystal podrobit větší deformaci a smykovému napětí.

Tab. 3.4. Hodnoty veličin S a maximální poměrné prodloužení

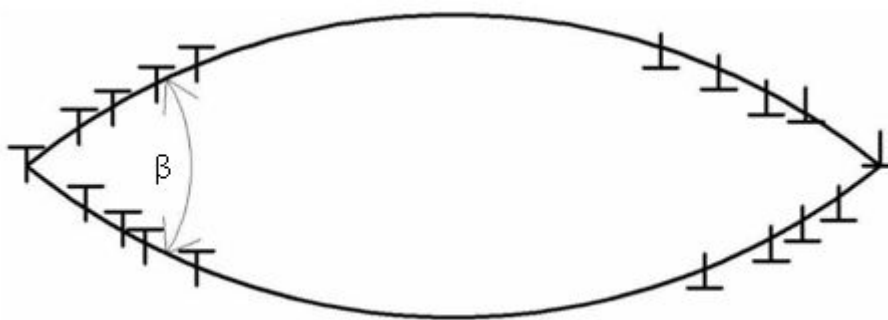
| Kov | Krystalová struktura | poměr c/a | S | $(l/l_0)_{\max} [\%]$ |
|--------------|----------------------|-------------|-------|-----------------------|
| Be | HCP | 1,568 | 0,199 | 10,4 |
| Ti | HCP | 1,587 | 0,167 | 8,7 |
| | | | 0,638 | 36,9 |
| | | | 0,255 | 11,9 |
| Zr | HCP | 1,589 | 0,167 | 8,7 |
| | | | 0,63 | 36,3 |
| | | | 0,225 | 11,9 |
| Mg | HCP | 1,624 | 0,131 | 6,8 |
| | | | 0,64 | 37,0 |
| Zn | HCP | 1,856 | 0,139 | 7,2 |
| Cd | HCP | 1,886 | 0,17 | 8,9 |
| Al | FCC | - | 0,707 | 41,4 |
| Au | FCC | - | 0,707 | 41,4 |
| Ag | FCC | - | 0,707 | 41,4 |
| Cu | FCC | - | 0,707 | 41,4 |
| Ni | FCC | - | 0,707 | 41,4 |
| γ -Fe | FCC | - | 0,707 | 41,4 |
| α -Fe | BCC | - | 0,707 | 41,4 |

3.2.4. Tvar dvojčat

Z uvedené geometrické analýzy lze předpokládat, že oblasti dvojčatění budou ohraničeny dvěma rovnoběžnými rovinami, které budou představovat koherentní rozhraní. Ve skutečnosti se však setkáváme spíše s čočkovitým tvarem dvojčat, jak je ukázáno na obr. 3.9. Tento tvar znamená, že rozhraní se musí skládat jak z koherentních, tak i nekoherentních segmentů. Tyto nekoherentní části rozhraní lze popsat v rámci dislokačního pole. Podle Mahajana a Williamse dochází k tvorbě dvojčete nejen v rámci heterogenní nukleace v určitém dislokačním poli, ale i pomocí homogenních nukleací v oblastech o vysoké koncentraci napětí. Zde je také důležité zmínit, že pomocí dislokací lze vysvětlit rozdíl v mnohem vyšší teoretické hodnotě potřebného napětí k pohybu hranic dvojčete než je tomu ve skutečnosti [7].

Cahn stanovil, že velikost úhlu β (viz obr. 3.9.) by se měla zvyšovat s klesajícím smykovým napětím. Protože velikost β ovlivňuje přípustnou tloušťku čočky, Cahnův

postulát správně předpovídal empirickou skutečnost, že tloušťka čočky se zvyšuje s klesajícím smykovým napětím. Teprve nedávno Friedel usoudil, že optimální tloušťka čočky v poměru vůči délce by měla vzrůstat s klesajícím smykovým napětím. Jelikož tvorba dvojčat zahrnuje nehomogenní deformaci, je nezbytné určité uspořádání a vhodný typ krystalické mřížky po obvodu čočky. Jestliže má daná mřížka nižší tažnost, úhel β bude menší a výsledná nespojitost v napětí může resultovat ve vytvoření trhliny. Pokud krystal samotný je snadno schopen skluzu, úhel β se bude zvětšovat a umožní tedy větší tloušťku dvojčete. V uspořádání krystalové mřížky, které mají vysokou tažnost, tloušťka deformačního dvojčete roste s klesajícím smykovým napětím. Na obr. 3.9. je potom zobrazen čočkovitý tvar dvojčete s dislokacemi k přizpůsobení nekoherentní hranice rozhraní. Úhel β roste s klesajícím smykovým napětím a narůstající schopností krystalu přizpůsobit se koncentraci napětí.



Obr. 3.9. Tvar dvojčete s dislokacemi

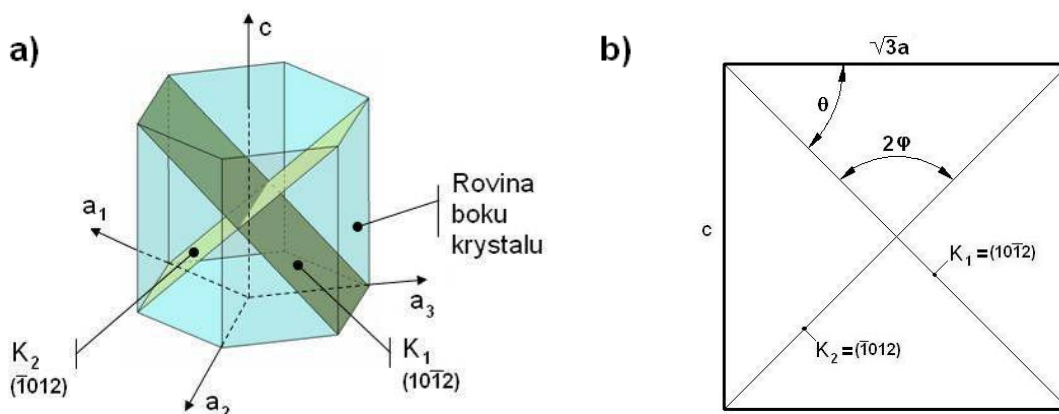
3.2.5. Napětí potřebné k dvojčatění

Je známo, že napětí potřebné k prvotnímu dvojčatění je mnohem větší než napětí potřebné k šíření již existujícího dvojčete. Obdobně nukleace dvojčete je spojena s náhlým poklesem zatížení (v tahové zkoušce se projeví určitým „rozkmítáním“ křivky $R-\epsilon$ – viz obr. 9.16.), zatímco růst dvojčat vykazuje mnohem hladší průběh zatížení. Existuje tedy potřeba velké koncentrace napětí k nukleaci dvojčete. Pro samotný růst však již není nezbytná. Tento předpoklad koncentrace napětí k zahájení deformace dvojčatěním vnáší velké pochyby k existenci samotného kritického smykového napětí (**CRSS** – **C**ritical **R**esolved **S**hear **S**tress) pro dvojčatění jako protějšku kritického skluzového napětí. Další pochyby vnáší také velký rozptyl ve výsledcích CRSS pro dvojčatění z experimentálního měření [14].

3.2.6. Dvojčatění v HCP mřížce

Mezi třemi hlavními typy krystalových mřížek pro kovy a jejich slitiny (FCC, BCC a HCP) má dvojčatění v HCP mřížce nejsnadnější průběh. Dvojčatění v kovech a jejich slitinách s HCP mřížkou lze pozorovat na poměrně velkém počtu rozdílných rovin, jak je vidět v tab. 3.3. Jeden běžný způsob dvojčatění mnoha HCP kovů je pomocí rovin $\{10\bar{1}2\}$. Jedna ze tří možných nastavení těchto rovin je potom na obr. 3.10a. Aktivace jednotlivých způsobů bude potom záviset na vlastním Schmidově faktoru. Je zřejmé, že dvojčatění nastane v rovině $\{10\bar{1}2\}$ a směru $\langle\bar{1}011\rangle$, kde je výsledné smykové napětí největší.

Pro bližší vysvětlení jsou na obr. 3.10b. ukázány úhlové poměry mezi nepřetvořenou rovinou $\{10\bar{1}2\}$, bazální rovinou a rovinou boku hranolu.



Obr. 3.10. Možnost ustanovení typu $\{10\bar{1}2\}$ rovin K_1 a K_2 v HCP krystalu.

a) Bazální rovina, roviny boku krystalu a dvě nepřetvořené roviny,

b) rovinné zobrazení podle směru a_2

Z obr. 3.10. vyplývá:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{c}{\sqrt{3}a} \quad (44)$$

Protože platí $2\varphi + 2\phi = 180^\circ$ potom:

$$\operatorname{tg} 2\phi = \frac{2}{S} = \operatorname{tg}(180 - 2\varphi) \quad (45)$$

S použitím podobnosti trojúhelníku lze napsat:

$$S = \frac{\operatorname{tg}^2 \varphi - 1}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (46)$$

Kombinací rovnic (44) a (46) po úpravě dostaneme:

$$S = \left[\left(\frac{c}{a} \right)^2 - 3 \right] \frac{\sqrt{3}a}{3c} \quad (47)$$

Z rovnice (47) je patrné, že mechanismus deformačního dvojčatění pro kovy s HCP mřížkou úzce souvisí s poměrem c/a vůči $\sqrt{3}$. Jestliže $c/a = \sqrt{3}$, potom $S = 0$ a nenastane dvojčatění způsobem $\{10\bar{1}2\}$. Stoloff a Gensamer tuto skutečnost ověřili v krystalu hořčíku legovaného kadmíem, aby se dosáhlo poměru $c/a = \sqrt{3}$. Hodnotu $\sqrt{3}$ lze tedy brát jako hraniční pro dvě různé situace deformačního dvojčatění a lze ji dobře ukázat pomocí berylia ($c/a = 1,568$) a zinku ($c/a = 1,856$) v porovnání pomocí napěťových diagramů (elipsoidů). Úhly mezi rovinami pro HCP kovy jsou určeny pomocí:

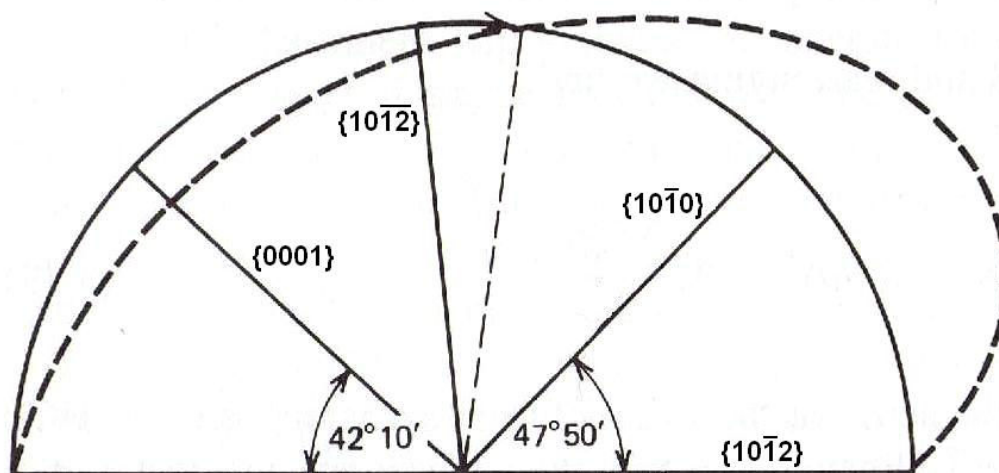
$$\cos \varphi = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + \frac{1}{2}(h_1 k_2 + h_2 k_1) + \frac{3a^2}{4c^2} l_1 l_2}{\left[\left(h_1^2 + k_1^2 + h_1 k_1 + \frac{3a^2}{4c^2} l_1^2 \right) \left(h_2^2 + k_2^2 + h_2 k_2 + \frac{3a^2}{4c^2} l_2^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (48)$$

pro Be a Zn jsou tyto mezirovinné úhly podány v tab. 3.5.

Tab. 3.5. Mezirovinné úhly pro Be a Zn

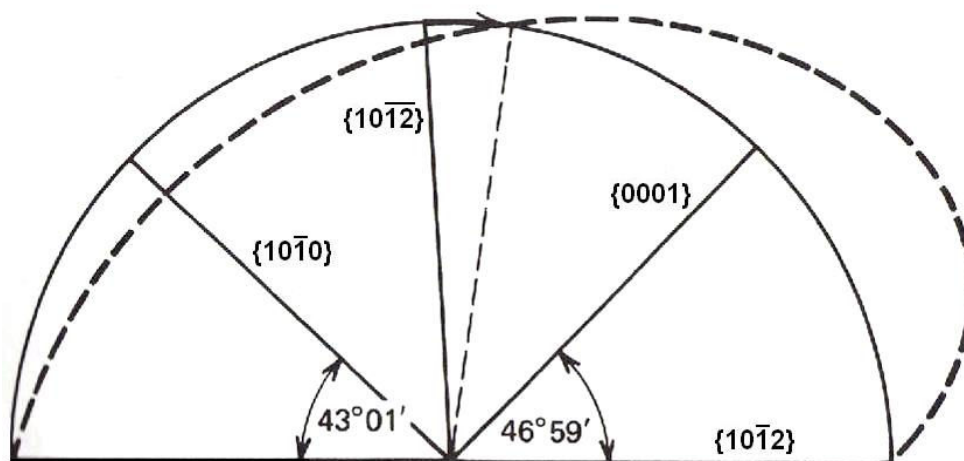
| Kov | Krystalografické roviny | | |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | $\{10\bar{1}2\} - \{0001\}$ | $\{10\bar{1}2\} - \{\bar{1}012\}$ | $\{10\bar{1}2\} - \{10\bar{1}0\}$ |
| Be | 42°10′ | 84°20′ | 47°50′ |
| Zn | 46°59′ | 86°02′ | 43°01′ |

Berylium (Be) má poměr $c/a = 1,568$ a je tedy $c/a < \sqrt{3}$. V tomto případě bazální rovina pólí ostrý úhel oddělující $\{10\bar{1}2\}$ rovinu a rovina boku hranolu rozděluje její doplněk na dvě části. Kromě toho může být rovina boku hranolu jednoduše umístěna podle skutečnosti, že musí ležet v úhlu 90° od bazální roviny. Na obr. 3.11. vidíme, že proces dvojčatění v beryliu zahrnuje zkrácení (stlačení) bazální roviny a natažení roviny boku hranolu. Následkem toho by tedy (jestliže byla bazální rovina krystalu orientována rovnoběžně se směrem zatížení) mělo dojít k dvojčatění, když je materiál namáhán tlakově. V případě tahového namáhání by potom nemělo docházet k dvojčatění za dané podmínky rovnoběžnosti. V případě tahového namáhání by v krystalu mělo docházet k dvojčatění pouze v případě orientace bazální roviny kolmo na směr působícího zatěžování.



Obr. 3.11. Napěťový elipsoid pro Be [7]

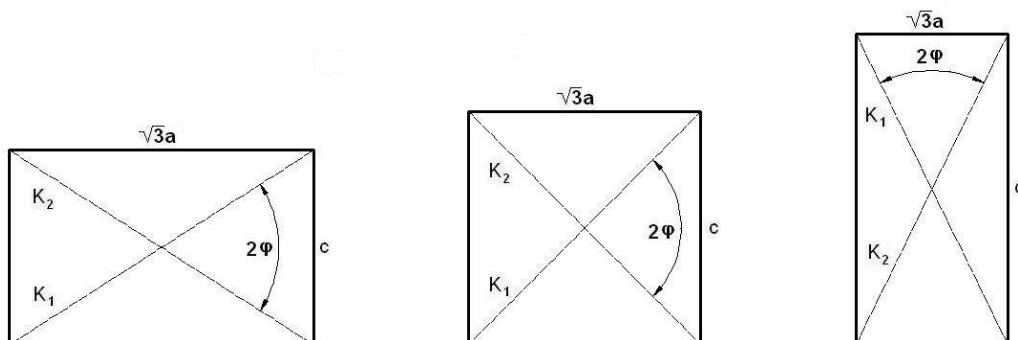
Zinek (Zn) má poměr $c/a = 1,856$ a je tedy $c/a > \sqrt{3}$. Jedná se tedy o zcela opačnou situaci než v případě berylia. V tomto případě, jelikož rovina boku hranolu rozděluje ostrý úhel mezi rovinami K_1 a K_2 , bude v zinku docházet k dvojčatění, když působící napětí způsobí zkrácení (stlačení) roviny boku hranolu nebo rozšíření bazální roviny (viz obr. 3.12.). K dvojčatění podle roviny $\{10\bar{1}2\}$ bude tedy docházet v případě tlakového napětí rovnoběžného s rovinou boku hranolu a nebo v případě tahového napětí rovnoběžného k bazální rovině. Obecně lze tedy říci, že v případě $c/a < \sqrt{3}$ bude k dvojčatění docházet, je-li tlakové zatížení rovnoběžné vůči bazální rovině a nebo tahové zatížení působí kolmo na rovinu boku hranolu. Opačná situace platí v případě $c/a > \sqrt{3}$, kde dojde k dvojčatění, když je rovina boku hranolu stlačována nebo bazální rovina podrobena tahovému napětí.



Obr. 3.12. Napěťový elipsoid pro Zn [7]

Ostatní možnosti dvojčatění v HCP mřížkách ukázaných v tab. 3.3. mohou nastat za určitých podmínek (viz obr. 3.13.). Nicméně nejsou přednostně preferovány, protože napěťová energie dvojčete narůstá s druhou mocninou S . Proto, jestliže je výsledné smykové napětí pro dané K_1 a η_1 dostatečné, dojde k mechanismu dvojčatění způsobem, který má nejnižší smykové napětí. Je však nutno si uvědomit, že zde nedochází pouze k výběru nejvhodnějšího způsobu dvojčatění, ale také k převládnutí jednoho ze dvou hlavních mechanismů plastické deformace za daných testovacích podmínek. Bylo např. zjištěno, že v zirkoniu se mechanismus skluzu v rovině boku krystalu a dvojčatění v rovině $\{10\bar{1}2\}$ vzájemně doplňují.

Ke skluzu dochází ve výhodných skluzových rovinách, jestliže je výsledné smykové napětí dostatečně vysoké. K dvojčatění dojde, jestliže je výsledné smykové napětí podél elementů dvojčatění K_1 a η_1 dostatečně vysoké a směr zatěžování souhlasí s procesem dvojčatění.



Obr. 3.13. Podmínky pro $\{10\bar{1}2\}$ dvojčatění v HCP krystalech

a) $c/a < \sqrt{3}$, **b)** $c/a = \sqrt{3}$, **c)** $c/a > \sqrt{3}$

3.2.7. Dvojčatění v BCC mřížce

V kovech s kubickou prostorově centrovanou mřížkou (BCC) byl mechanismus dvojčatění sledován především pro feritické ocele a to z důvodů jejich strojírenské významnosti. U těchto materiálů dochází k tvorbě dvojčat obtížněji než k jejich pohybu. Jedním z možných mechanismů je nukleace způsobená koncentrací napětí na čele nakupení dislokací vzniklého náhlým skluzem při uvolnění Frank-Readova zdroje z jeho atmosféry. Toto chování je preferováno při rázovém zatížení a je známo, že tímto způsobem vznikají za pokojové teploty v α -Fe dvojčata ve tvaru lamel (nazývané jako Neumannovy pásy). Při běžných rychlostech deformace by však snázeji mělo docházet k náhlému skluzu vhodnému k nukleaci dvojčat a to v látce se silně zakotvenými dislokacemi.

K dvojčatění tedy dochází snadněji za vyšších rychlostí deformace a nebo za nižších testovacích teplot. Rovinou dvojčatění je rovina $\{112\}$ se směrem smyku rovnoběžným s $\langle \bar{1}11 \rangle$.

3.2.8. Dvojčatění v FCC mřížce

Dlouhou dobu převládal mezi vědci názor, že kovy s kubickou plošně centrovanou mřížkou (FCC) se nedeformují dvojčatěním. Blewitt a jeho spolupracovníci však dokázali, že dochází ke vzniku dvojčat ve vhodně orientovaných krystalech Cu, Ag a Au při nízkých teplotách. Později bylo prokázáno dvojčatění také v Ag i za 0°C , jsou-li krystaly vhodně orientovány. Ukázalo se, že horní hranice teplot, při které dochází k dvojčatění, klesá s rostoucím obsahem Au jako příměsi. Skutečnost, že se dvojčatění realizuje pouze v jistých orientacích a za nízkých teplot, se dá vysvětlit pomocí výskytu vysokých skluzových napětí za těchto podmínek – elementy dvojčatění $\{111\}$, $\{11\bar{1}\}$, $\langle 11\bar{2} \rangle$ a $\langle 112 \rangle$ odpovídají vysokému napětí. Proces skluzu atomů je tedy mnohem více preferovanější než dvojčatění. Zde je však třeba zmínit důležitou skutečnost a sice, že zatímco deformační dvojčatění lze u těchto materiálů nalézt pouze za určitých extrémních podmínek, na druhou stranu však vykazují kovy s kubickou plošně centrovanou mřížkou vznik žíhacích dvojčat. Tedy dvojčat vzniklých během růstu rekrytalizovaných zrn z původní deformované struktury mající vysokou energii vrstevné chyby.

3.2.9. Základní aspekty procesu dvojčatění

Vzhledem k zaměření této práce bych rád věnoval jednu kapitolu shrnutí základních poznatků ohledně procesu dvojčatění při plastické deformaci. Tyto základní aspekty procesu dvojčatění jsou uvedeny v tab. 3.6.

Tab. 3.6. Základní aspekty procesu dvojčatění

| Bod číslo | Charakteristika procesu dvojčatění |
|-----------|--|
| 1 | Krystalová dvojčata se mohou vytvářet již při tuhnutí roztoků nebo tavenin minerálů a solí. Obecně ke dvojčatění mají však tendenci pouze některé druhy plošně centrovaných mřížek. V případě polykrystalů je dvojčatění doprovázeno skluzem. Výsledná plastická deformace je tedy dána vzájemnou kombinací skluzu a dvojčatění . |
| 2 | U hexagonálních typů mřížek (např. Zn) dvojčatění výraznou měrou usnadňuje proces plastické deformace skluzem, jelikož proces dvojčatění vede k příznivé orientaci mřížek. |
| 3 | V důsledku působení vnějších sil (tedy za určité koncentrace napětí) dochází k tzv. mechanickému dvojčatění krystalů . Dochází k němu však pouze v určitém systému krystalografických rovin a směrů. Pohyb atomů je malý a výrazně uspořádaný [5]. |
| 4 | K nukleaci dvojčatění je třeba vysokých hodnot napětí. S ohledem na tuto skutečnost deformace za pokojové teploty proběhne téměř vždy skluzem. |
| 5 | Orientace zrn do velké míry rozhoduje o výsledném mechanismu deformace (skluz nebo dvojčatění a to i pro lokální oblast zrna), ale také o kinetice různých typů transformace. Dvojčatění tedy může být velmi výrazně ovlivněno buď orientací krystalů a nebo velikostí napětí působícího na materiál, jelikož zvyšování tohoto napětí může vyvolávat dvojčatění také v zrnech, která původně preferovala deformaci skluzem [15]. |
| 6 | Snížením energie vrstevné chyby (SFE) lze vyvolat proces dvojčatění (v kombinaci se skluzem) také za pokojové teploty. Tento jev se obecně nazývá jako tzv. TWIP efekt (TWinning Induced Plasticity). |

| | |
|----|---|
| 7 | Výrazným znakem po tepelném zpracování žíháním je vznik tzv. žíhacích dvojčat. Jedná se o určité rovné pásy vyskytující se napříč zrna. Velký rozdíl je však v samotné podstatě dvojčat. Žíhací dvojčata svým vznikem předchází procesu plastické deformace. |
| 8 | Dvojčatění představuje natočení jedné části krystalu vůči druhé kolem roviny dvojčatění – nastává zrcadlový obraz (viz obr. 3.5.). Převládá představa, že tento děj probíhá v jednotlivých vrstvách sice postupně, ale velmi rychle. Výsledně lze tedy hovořit o lavinovitém skluzu. Ve skutečnosti tvorbu dvojčat (např. u olova) doprovází akustická vlna a nebo se na křivce zpevnění objevují výrazné „zuby“. |
| 9 | Vzniklé dvojče vytváří velmi silnou překážku pohybu dislokací, což může ve svém důsledku (při nahromadění dislokací) vyvolat vznik trhliny. Obdobně však může trhlina vzniknout také při průniku dvojčat. |
| 10 | Výpočet kritického napětí při dvojčatění na základě teoretických znalostí o dvojčatění stále nepřináší uspokojivé výsledky. Snaha vědců se v poslední době koncentruje na přístup s využitím znalostí o energii vrstevné chyby a energii rovinné chyby (GPFE - G eneralized P lanar F ault E nergy) [14]. |
| 11 | V austenitických ocelích prvky (Mn nebo Ni) stabilizují austenit a vytváří tak velmi výhodné vlastnosti těchto ocelí, které jsou obecně dosaženy pomocí kombinace nejenom deformace skluzem a dvojčatěním, ale také martenzitickou přeměnou indukovanou deformací (TRIP a TWIP ocele). Výsledná struktura takovýchto materiálů pak může být poměrně komplikovaná, což poněkud ztěžuje její metalografické popsání. |
| 12 | Proces mechanického dvojčatění v materiálu a vytváření stále nových dvojčat velmi výrazně omezuje pohyb dislokací v materiálu, což ve svém důsledku vede k velmi výraznému zpevňování daného materiálu [16]. Modelování tohoto jevu pomocí fyziky pevné fáze je v posledních letech předmětem velkého zájmu badatelů na celém světě. Obecný přístup k této problematice je pomocí tzv. střední volné dráhy dislokací MFP (M ean F ree P ath of Dislocations) a její redukci během procesu dvojčatění [17, 18]. |
| 13 | Charakteristické tvary dvojčat jsou dobře rozeznatelné jak pomocí světelné mikroskopie, tak také díky elektronové mikroskopii . Tato je však schopna také osvětlit základní charakter pásů dvojčat v materiálu. Tedy, že se spíše jedná o nahromaděné vrstvy mikrodvojčat (viz kap. 7.2.3.), jejichž tloušťka hraje velmi důležitou roli pro modelování TWIP efektu. |

4. Zkoušky hodnocení pevnostních plechů

V technické praxi při hodnocení materiálů s vysokými pevnostními hodnotami se používají stejné zkoušky jako pro ostatní zpracovávané materiály. Pro průmyslové aplikace (zejména v automobilovém průmyslu) je důležité znát mechanické hodnoty zpracovávaných plechů vzhledem k technologiím zpracování – především se jedná o technologii tažení. Pro hodnocení plechů se nejčastěji používá statická zkouška tahem spolu s technologickými zkouškami tvárnosti. Pro technologické zkoušky plechů je společným znakem dosažení definovaného mezního stavu při daných podmínkách testování (rychlost deformace, teplota atd.). Obecně lze rozdělit mechanické zkoušky do dvou základních skupin na:

- **základní zkoušky** – jsou dány normou za předem definovaných podmínek testování, jedná se např. o statickou zkoušku tahem nebo zkoušky tvrdosti
- **napodobující zkoušky** – jedná se o zkoušky, které slouží k určitému bližšímu přiblížení podmínek testování pro jednotlivé technologie zpracování materiálu. Pro jednotlivé technologické zkoušky se používají zcela odlišná zařízení a vzorky, patří sem např. kalíškovací zkouška nebo zkouška hloubením dle Erichsena.

4.1. Statická zkouška tahem

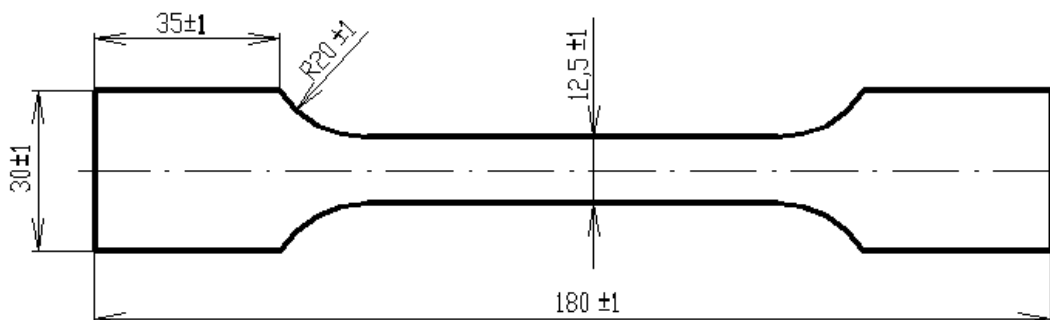
Jedná se o nejčastěji používanou a také nejdůležitější zkoušku pro zjištění základních mechanických hodnot daného materiálu. Je zkouškou základní a je tedy předepsána normou ČSN EN 10002-1 [19]. Podle této normy mohou být zkušební tyče tzv. poměrné nebo nepoměrné.

Poměrné vzorky jsou takové, kde se počáteční měřená délka L_0 vztahuje k počáteční ploše příčného průřezu zkušební vzorku S_0 . Počáteční měřená délka L_0 je potom dána vztahem:

$$L_0 = k\sqrt{S_0} \quad (49)$$

kde: k - koeficient odvozený od určení počáteční měřené délky tyče
($k = 5,65$ pro $L_0 = 5d_0$ – dříve tzv. krátká tyč a $k = 11,3$ pro $L_0 = 10d_0$ – dlouhá tyč).
Tyto vzorky se však nepoužívají pro hodnocení plechů.

Nepoměrné vzorky nemají počáteční měřenou délku L_0 vázanou na počáteční průřez tyče S_0 , který je v tomto případě obdélníkový. V praxi se používají délky 50, 80, 100 a 120 mm. Není však možné je volit libovolně, jelikož jejich volba závisí na samotných rozměrech testovaných vzorků. Ukázka zkušebního nepoměrného vzorku pro $L_0 = 50$ mm je na obr. 4.1.



Obr. 4.1. Zkušební nepoměrný vzorek o $L_0 = 50$ mm podle ČSN EN 10002-1

Zkouška je normalizována pro rychlost posunu příčnicku $v = 10$ mm/min a teplotu. Vzorek je upnut do čelistí trhačího stroje a namáhán neustále se zvyšující silou F . Dochází tedy k deformaci vzorku, až při určité hodnotě tahového zatížení dojde k lokalizaci deformace (vzniku krčku) a lomu vzorku. Z počáteční měřené délky L_0 se zkoušená tyč prodlužuje na okamžitou délku $L = L_0 + \Delta L$. V průřezu současně dochází ke zmenšování počátečního průřezu S_0 na konečnou hodnotu S_k . Ve zkušebním vzorku dochází ke vzniku napětí $\sigma = F/S$ (**skutečné napětí**). Je však poměrně obtížné měřit okamžitý průřez tyče S . Proto se používají tzv. **smluvní napětí** $R = F/S_0$, která jsou vztahena k počátečnímu průřezu tyče. Pro vyjádření deformace se používá poměrné prodloužení $\varepsilon = \Delta L/L_0$. ε je tedy bezrozměrná veličina. Z takovýchto veličin (**R- ε**) je potom sestaven smluvní tahový diagram, který má na ose y smluvní napětí R a na ose x je potom vyneseno poměrné prodloužení ε .

Pro vlastní vyhodnocení zkoušky se používají následující důležité charakteristiky materiálu [20]. Sem patří **výrazná mez kluzu R_e , nevýrazná (smluvní) mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti v tahu R_m , poměrné prodloužení ε , kontrakce Z a tažnost A_x** (index x u nepoměrné zkušební tyče značí použitou počáteční měřenou délku L_0). Tyto smluvní hodnoty lze na **skutečné napětí σ** a **skutečné přetvoření φ** [-] přepočítat pomocí:

$$\sigma = R(1 + \varepsilon) \quad (50)$$

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (51)$$

4.1.1. Definice základních veličin

Výrazná mez kluzu R_e je definována jako počátek plastických deformací. Jedná se tedy o napětí, při jehož dosažení dochází k plastické deformaci bez přírůstku zatížení. Někdy lze ještě rozlišit horní a dolní mez kluzu R_{eH} a R_{eL} (např. pro deformačně vystárlé materiály). Lze ji určit jako [21]:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (52)$$

kde: F_e - síla odpovídající výrazné mezi kluzu [N]

Nevýrazná (smluvní) mez kluzu $R_{p0,2}$ se určuje jako napětí odpovídající trvalé absolutní deformaci $\Delta L = 0,2\%$ ($\varepsilon = 0,002$) a počítá se jako:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad (53)$$

kde: $F_{p0,2}$ - síla odpovídající trvalé absolutní deformaci 0,2% [N]

Mez pevnosti R_m je napětí odpovídající maximální síle F_{\max} naměřené v celém průběhu zkoušky. Spočítá se tedy jako:

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad (54)$$

kde: F_{\max} - maximální naměřená síla [N]

Tažnost A_x je dána jako maximální poměrné trvalé prodloužení ε_u vyjádřené v [%]. Lze tedy napsat:

$$\varepsilon_u = \frac{\Delta L_u}{L_0} = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad (55)$$

$$A_x = 100\varepsilon_u = 100 \frac{\Delta L_u}{L_0} [\%] \quad (56)$$

kde: L_u - délka po přetržení vzorku [mm],

ε_u - maximální poměrné trvalé prodloužení [-].

Kontrakce Z (zúžení) se v technické praxi většinou používá pouze u kruhových tyčí jako procentuální poměr příčného průřezu po přetržení tyče S_u vůči počátečnímu průřezu S_0 . Spočítá se jako:

$$Z = 100 \frac{\Delta S}{S_0} = 100 \frac{S_0 - S_u}{S_0} [\%] \quad (57)$$

kde: S_u - průřez tyče v místě přetržení [mm²]

4.1.2. Ukazatelé tvářitelnosti

Definované základní veličiny mají vypovídající hodnotu hlavně v oblasti pružnosti a pevnosti a také pro základní porovnávání materiálů mezi sebou. O samotné tvářitelnosti materiálu jako vhodnosti pro zvolenou tvářecí operaci však nic neříkají. Na jejich základě však byly tedy odvozeny následující ukazatelé tvářitelnosti.

Ukazatel hlubokotažnosti (UH) je důležitým ukazatelem pro vyhodnocování vhodnosti plechu pro hluboké tažení. Je dán jako:

$$UH = \frac{R_{p0,2}}{R_m} [-] \quad (58)$$

Zásoba plasticity (ZP) je dalším podstatným parametrem především pro hluboké tažení plechů, která zohledňuje i tažnost daného materiálu:

$$ZP = k(R_m - R_{p0,2})A_x \text{ [MPa]} \quad (59)$$

kde: k - koeficient zaplnění plochy [-]

Komplexní ukazatel tvářitelnosti (KUT) potom zohledňuje oba předešlé ukazatele a kombinuje nejen hodnoty deformačního odporu ($R_{p0,2}$, R_m), ale i deformační schopnosti (A_x) materiálu:

$$KUT = \frac{R_{p0,2}}{R_m} A_x \quad (60)$$

Metody jejich určení však nejsou dané normou. Pro praxi je jako další charakteristika technologické tvářitelnosti plechů používán tzv. **exponent deformačního zpevnění n** , který je definován jako exponent v rovnici (61), který vyjadřuje závislost skutečného napětí σ na skutečném přetvoření φ pro případ jednoosého zatěžování (jedná se vlastně o vhodnou aproximaci křivky zpevnění vhodné pro hluboké tažení):

$$\sigma = C\varphi^n \text{ [MPa]} \quad (61)$$

kde: C - modul monotónního zpevnění [MPa],
 n - exponent deformačního zpevnění [-].

Pro přesnější aproximaci i pro oblast pružných deformací se používá aproximace podle Swifta-Krupkovského:

$$\sigma = C(\varphi_0 + \varphi)^n \text{ [MPa]} \quad (62)$$

kde: φ_0 - posunutí křivky zpevnění pro dosažení meze kluzu při $\varphi = 0$ [-]

Čím vyšší je hodnota n , tím je rovnoměrnější rozložení přetvoření při zkoušce tahem a tedy i možné větší celkové přetvoření. Konstanty C a n také patří k základním datovým hodnotám potřebným pro numerické simulace plošného tváření a je tedy velice důležité jejich přesné určení pomocí numerických metod. K tomuto zjištění lze použít následující metody.

Nepřímá metoda linearizuje rovnici (61). Je nezbytné změřit křivku zpevnění v souřadnicích σ_i - φ_i , tedy v hodnotách intenzity napětí a přetvoření. V grafu se použijí logaritmické souřadnice intenzit napětí a deformace σ_i - φ_i a provede se grafická interpolace přímkou:

$$\log \sigma_i = \log C + n \log \varphi_i \quad (63)$$

kde: σ_i - intenzita napětí [MPa],
 φ_i - intenzita přetvoření [-].

V současnosti se však již grafické interpolace nevyužívá a vlastní výpočet hodnoty n provádí příslušný software. Je však nezbytné vymezit vhodné intervaly. K tomuto účelu slouží řada norem, z nichž každá doporučuje jiný interval hodnot velikosti deformace použitý k vlastnímu výpočtu. Jejich stručný přehled je v tab. 4.1.

Tab. 4.1. Rozsahy intervalů pro výpočet hodnoty n podle různých norem [22, 23]

| Norma | Interval |
|---------------------|---|
| ČSN ISO 10275 | Rozsah hodnot rovnoměrné plastické deformace od $\varphi = 5\%$ až do maximální hodnoty rovnoměrného přetvoření |
| EN 10 130 + A1:2000 | $\varphi = <10; 20>\%$ V případě, že maximální rovnoměrné přetvoření nedosahuje $\varphi = 20\%$ potom interval $\varphi = <10; 15>\%$ |
| ASTM E 646 - 78 | Libovolný interval mezi mezí kluzu jako minimem a mezí pevnosti jako maxima daného intervalu |

Je zřejmé, že použitím každé z norem můžeme získat jinou hodnotu exponentu n . Je tedy nutné vždy uvést příslušný interval aproximace. Pro vyhodnocení tahových zkoušek pevnostních materiálů je patrně nejvýhodnější použití normy (ASTM E 646-78) s optimálním výpočtovým intervalem, který vždy volíme vzhledem k tažnosti daného materiálu. V některých případech nedostačuje použitá aproximační křivka a je nutné použít například polynom druhého nebo třetího stupně.

4.1.3. Anizotropie materiálu

Anizotropie materiálu obecně představuje směrovost vlastností. Jedná se tedy o závislost velikosti výsledných materiálových charakteristik na směru odebrání vzorků a je tak nezbytné vždy k příslušnému výsledku anizotropie materiálu doplnit také směr odebrání vzorku vůči směru válcování. K dosažení anizotropie materiálu je třeba vždy naorientovat krystalovou mřížku daného materiálu. Jako nejvýhodnější z hlediska anizotropie plechu je vhodné, aby směr $\langle 111 \rangle$ byl kolmý na rovinu plechu.

Obecně lze **normálovou anizotropii** r_α definovat jako podíl přetvoření ve směru šířky φ_b a přetvoření ve směru tloušťky φ_s v odpovídajícím směru α :

$$r_\alpha = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \quad (64)$$

Z hlediska tváření je tedy snahou mít co nejvyšší hodnotu normálové anizotropie r_α , jelikož deformace materiálu se poté realizuje na úkor šířky než tloušťky. Pro běžné hlubokotažné materiály je velikost $r_{45} \approx 1,9$; $r_0 \approx 2,1$ a $r_{90} \approx 2,4$. Pro čistě izotropní materiál (bez vlivu anizotropie) pak platí $r_\alpha = 1$. Je však poměrně obtížné měřit změnu tloušťky a vzorec (64) se poté upravuje pomocí zákona zachování objemu a přetvoření ve směru délky φ_L , kde platí:

$$\varphi_L + \varphi_b + \varphi_s = 0 \quad (65)$$

$$\varphi_s = -(\varphi_L + \varphi_b) = -\ln \frac{Lb}{L_0b_0} \quad (66)$$

Pomocí (66) lze nakonec odvodit výsledný vzorec pro normálovou anizotropii r_α , kde stačí změřit pouze délku a šířku měřeného vzorku:

$$r_\alpha = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{-\ln \frac{Lb}{L_0b_0}} = \frac{\ln \frac{b_0}{b}}{\ln \frac{Lb}{L_0b_0}} \quad (67)$$

Měření normálové anizotropie r_α většinou probíhá ve třech hlavních směrech a to 0° , 45° a 90° vůči směru válcování. Pomocí r_α pro tyto směry lze definovat také **plošnou anizotropii** Δr a **střední hodnotu anizotropie** $r_{stř}$ jako:

$$\Delta r = \frac{1}{2}(r_0 + r_{90} - 2r_{45}) \quad (68)$$

$$r_{stř} = \frac{1}{4}(r_0 + r_{90} + 2r_{45}) \quad (69)$$

4.2. Diagramy mezních přetvoření

Při hodnocení tvářitelnosti tenkých ocelových plechů je však pro posouzení lisovatelnosti materiálu nutné respektovat různé stavy napjatosti, které se mohou v procesu tváření vyskytnout. Výsledné vlastnosti plechu se pak mohou zobrazovat ve formě diagramu, který bude postihovat celý interval těchto stavů napjatosti a jenž bude zobrazovat mezní stav bezpečného lisování daného materiálu. Výsledkem je **diagram mezních přetvoření (DMP)** a hranicí lisovatelnosti je **křivka mezních přetvoření (KMP)**. Lze tedy konstatovat, že DMP je jakousi „mapou plasticity“ zkoumaného materiálu.

Teoretické vysvětlení DMP vychází z podmínek ztrát stability během tváření, kdy je přírůstek sil působících na materiál rovný nule nebo dokonce záporný ($dF \leq 0$). Dle mechanického přetvoření se dají rozlišit tři nestabilní stavy [24]:

- 1) **Ztráta stability na mezi kluzu** – objevuje se v oblasti malých plastických deformací. Dochází k tvorbě povrchových vrásek, které však při nárůstu přetvoření do oblasti rozvinutých plastických deformací vymizí.
- 2) **Ztráta stability vybočením vlivem tlakových napětí** – odpovídá svým charakterem ztrátě stability při namáhání na vzpěr. V oblasti tažení výlisků se jedná o zvlnění v oblasti přídržovače nebo na volném povrchu výlisku. Odstranění této stability spočívá především v použití vhodné velikosti přídržovacího tlaku pro případ zvlnění v oblasti příruby vzorku a nebo ve snaze o změnu stavu napjatosti či vytvoření místního prolisu pro případ vzniku vln na volném povrchu výlisku.
- 3) **Ztráta stability na mezi pevnosti** – objevuje se v oblasti velkých plastických přetvoření. S ohledem na tváření má tato ztráta stability největší význam, neboť po jejím dosažení nastává nebezpečí vzniku trhliny na daném výlisku. Při jednoosém tahovém stavu napjatosti lze na testovaném vzorku při dosažení meze pevnosti dobře pozorovat změnu přetvoření, kdy se z původně rovnoměrného přetvoření vyvine lokalizované, které se projeví tvorbou krčku. Takto lokalizované přetvoření představuje velmi nerovnoměrné přetvoření vzorku, jelikož veškeré další přetvoření je lokalizováno pouze do oblasti krčku až do okamžiku lomu materiálu. U dvouosé napjatosti je již situace poněkud odlišná a je nutno brát v úvahu např. také vliv anizotropie materiálu.

Obecně tedy při lisování souvisí ztráta stability procesu s náhlým vyčerpáním plastických schopností materiálu a vzniku lomu. Jedním z faktorů, který ovlivňuje schopnost k plastické deformaci materiálu, je také stav napjatosti. Označíme-li hlavní normálová napětí v rovině plechu σ_1 a σ_2 ($\sigma_3 = 0$ a $|\sigma_1| \geq |\sigma_2|$), lze napsat [25]:

$$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : m_\sigma : 0 \quad (70)$$

kde: m_σ - ukazatel stavu napjatosti [-]

Ukazatel stavu napjatosti m_σ tedy nabývá hodnot $m_\sigma \in \langle -1, 1 \rangle$ a jeho velikost je:

$$m_\sigma = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (71)$$

Normálovým napětím následně odpovídají příslušná přetvoření definována jako logaritmická přetvoření φ_1, φ_2 ($\varphi_3 = 0$). Za daných rychlostně teplotních podmínek je výhodné mezní stavy přetvoření vyjádřit v závislosti na napjatosti a následně všechna tři hlavní přetvoření vyjádřit pomocí intenzity přetvoření, která v případě dosažení mezního stavu odpovídá **kritické intenzitě přetvoření φ_{ik}** :

$$\varphi_{ik} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_{1k} - \varphi_{2k})^2 + (\varphi_{2k} - \varphi_{3k})^2 + (\varphi_{3k} - \varphi_{1k})^2} \quad (72)$$

kde: φ_{ik} - kritické mezní přetvoření [-]

Souřadnice m_σ - φ_{ik} pak lze použít k sestrojení DMP. Tohoto postupu použil ve svých studiích např. Tomlenov. KMP tedy odpovídají ztrátě stability na mezi pevnosti. Jedná se však poněkud o pracné hledání obou souřadnic (pomocí intenzity přetvoření φ_i) a tak již v polovině 60. let bylo Keelerem a Goodwinem navrženo k sestrojení DMP použít přímo naměřené hodnoty kritických hlavních normálových přetvoření φ_{1k} a φ_{2k} při daných stupních napjatosti. Jedná se tedy o závislost **hlavního (největšího) přetvoření φ_1 - major strain** a **vedlejšího (minimálního) přetvoření φ_2 - minor strain**. Jednotlivé stavy napjatosti pak charakterizuje m_σ . Přímo na výlisku lze však pomocí deformační sítě přímo změřit hodnoty přetvoření vzniklé v důsledku působení napětí v daném místě. Je tedy výhodné pro proporcionální přetvoření definovat také **ukazatel stavu přetvoření m_φ [-]** jako:

$$m_\varphi = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (73)$$

Ukazuje se tedy jako nejvýhodnější sestřít DMP v souřadnicích φ_2 - φ_1 a k určení konkrétního stavu napjatosti použít m_φ . Obecně je zřejmé, že $m_\varphi \in \langle -1; 1 \rangle$, podle zkušeností pak ke vzniku trhlin na výliscích dochází v intervalu $m_\varphi \in \langle -0,5; 1 \rangle$.

4.2.1. Určování DMP početními metodami

V případě lisování výlisků z plechu je plastická deformace obecně ve své podstatě procesem lokalizace přetvoření, zužování těchto přetvářených oblastí, což v konečné fázi vede ke vzniku tvárného lomu.

Různé teorie a studie ohledně lokalizace plastického toku materiálu používají velké množství pojmů k charakterizování tohoto děje. Jedná se např. o „zužování“ (necking), ztrátu stability nebo teorii rozdvojení (bifurcation). Jev zužování lze pozorovat např. již při zkoušce tahem a lze jej rozdělit na tzv. difúzní a lokální zužování. Ztráta stability poté souvisí s okamžikem, kdy se rovnoměrné přetvoření stává nestabilním. Pojem rozdvojení představuje počátek vzniku lokálního zúžení.

Snahou o nalezení a využití početních metod pro stanovení KMP se zabývala velká řada autorů. Tyto metody jsou položeny na základě teoretického rozboru vlastností materiálu a to především pomocí teorie plasticity. Jedná se o snahu vyjádření funkce materiálových charakteristik naměřených pomocí zkoušky tahem a pomocí stavu napjatosti. Všechny metody posléze vycházejí z různých definic dosažení vlastního mezního stavu [26]. Jejich základní přehled je podán v tab. 4.2.

Tab. 4.2. Početní metody stanovení DMP

| Početní metoda | Charakteristika metody |
|----------------------------------|---|
| Teoretické Goodwin-Keelerovy DMP | Matematické určení okamžiku ztráty stability na mezi pevnosti, kdy pro „levou“ větev DMP je uvažována podmínka lokální ztráty stability a pro „pravou“ větev podmínka difúzní ztráty stability. |
| MK teorie | Tato metoda vytvořená Marciniakem a Kuczińským vychází z předpokladu, že materiál obsahuje výchozí nehomogenity (např. nerovnoměrnost tloušťky plechu), které vedou ke vzniku lokálních ztenčení. |
| Křivka přetvoření dle Ghosche | Metoda odvozená A.K.Ghoshem podle poznatků ohledně mechanismu tvárného lomu. Tato metoda předpokládá porušení materiálu v důsledku spojení dutin, které vznikly kolem vměstků přítomných v materiálu. |

Je třeba zdůraznit, že výsledné vztahy pro všechny početní metody používají velké množství zjednodušujících předpokladů, které mohou být poměrně velmi často vzdálené od reality. Nelze však brát teoreticky v úvahu všechny aspekty ovlivňující proces vzniku lokálních ztenčení (tloušťka plechu, tření, historie tváření atd.).

4.2.2. Určování DMP experimentálním způsobem

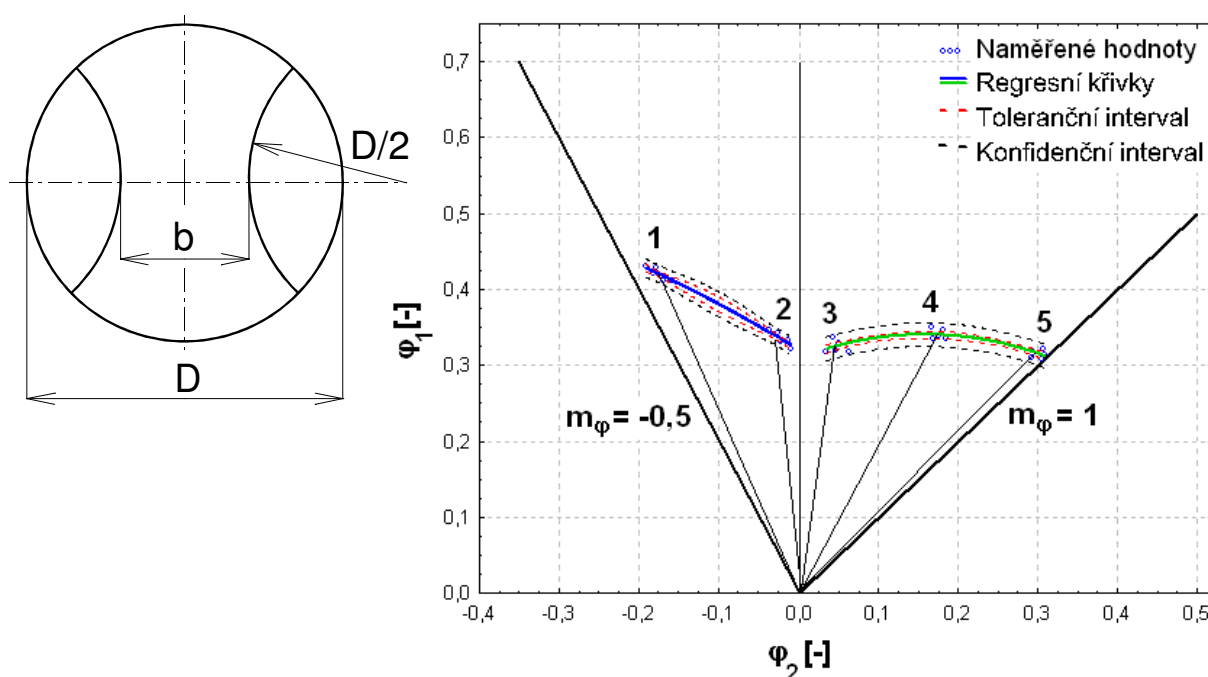
Tato skutečnost velmi omezuje využití teoretických KMP pro zjišťování DMP. Z tohoto důvodu se v současné době téměř výhradně k jejich sestavení používají **experimentální metody**. Základem je znovu samotná definice mezního stavu, při jehož dosažení budou vyhodnocovány odpovídající mezní přetvoření $[\varphi_{2k}; \varphi_{1k}]$ a to při různých stavech napjatosti. Z tohoto důvodu je volbě mezního stavu také věnována samostatná kapitola 4.2.3.

Pro experimentální zjištění DMP je tedy třeba dle definování mezního stavu naměřit množství hodnot dvojic **mezních přetvoření** $[\varphi_{2k}; \varphi_{1k}]$ v rozsahu **stavů přetvoření** $m_{\varphi} \in (-0,5; 1)$. Jelikož postup původně použitý „otcem DMP“ Keelerem, tedy experimentální měření na různých typech výlisků, je velmi pracný, používají se v současnosti ke zjišťování DMP experimentálním způsobem laboratorní podmínky. Nejvíce rozšířené laboratorní zkoušky jsou pak popsány v tab. 4.3.

Tab. 4.3. Metody stanovení DMP v laboratorních podmínkách

| Metoda | Charakteristika metody |
|--|---|
| Zkouška tahem tyčí opatřených různými vruby | Modelování různých stavů přetvoření díky různým tvarům vrubů. Jednoduchá příprava, avšak využití pouze pro „levou“ větev KMP. |
| Zkouška hydrostatická s kruhovou či eliptickou tažnicí | Různé stavy přetvoření pomocí eliptických tažnic s proměnnou velikostí hlavních os. Vyžaduje speciální zkušební zařízení a její využití je pouze pro „pravou“ větev KMP. |
| Zkouška hloubením plechu tažníky různých poloměrů | Potřeba tažníků různých poloměrů a využitelnost pouze pro „pravou“ větev KMP. |
| Zkouška vypínání zkušebních těles v podobě pruhů proměnné šíře (tzv. Nakazima test) | Kombinace předešlých metod pro simulování celého intervalu stavů přetvoření. Potřeba vzorků mající rozdílnou šířku. |
| Zkouška vypínání tvarových nástřihů s vystřiženými kruhovými segmenty konstantního poloměru polokulovým tažníkem | Patrně nejvýhodnější metoda simulující celý interval stavů přetvoření. Pro přípravu vzorků stačí jeden střížný nástroj. Nevýhodou je naopak patrná nespojitost mezních přetvoření v oblasti rovinného přetvoření ($\varphi_2 = 0$) – platí i pro Nakazima test. |

Posledně zmíněná metoda je vzhledem ke svojí podstatě a náročnosti na nástroje a přípravu vzorků patrně nejvíce používanou metodou experimentálního zjišťování DMP. Její největší výhodou je plynulé pokrytí celého intervalu stavů přetvoření m_φ a nenáročnost na nástroje pro stříhání vzorků. Jak je vidět z obr. 4.2., k postupnému zvětšování šířky vzorků b stačí pouze měnit velikost kroku na střížném nástroji. Každá změna šířky modeluje rozdílný stav přetvoření m_φ a to od případu plného nástřihu ($b = D$; deformační stopa 5), což odpovídá $m_\varphi = 1$. Jedná se o rovnoosé vypínání testovaného materiálu. Naopak vzorek mající minimální šířku ($b = 30$ mm; deformační stopa 1) odpovídá stavu přetvoření pro zkoušku tahem, kdy $m_\varphi = -0,5$.



Obr. 4.2. Tvar zkušebních těles a zjednodušený DMP pro 5 deformačních stop

Na obr. 4.2. také vidíme schématické znázornění zjednodušeného DMP pro 5 deformačních stop v rozsahu stavu přetvoření $m_\varphi \in \langle -0,5; 1 \rangle$. Bylo změřeno, že pro plynulé pokrytí tohoto intervalu je nutno použít vzorků celkem o **13-ti** různých šířkách. Pro běžné potřeby (např. dle množství materiálu) zjišťování DMP však obvykle v praxi stačí použít 5÷7 deformačních stop. Zde je třeba také zdůraznit velký vliv anizotropie materiálu na výslednou polohu KMP v DMP, což platí zejména pro testování hlubokotažných materiálů. Z tohoto důvodu se většina DMP zjišťuje pro směr odebrání 0° vůči směru válcování. V současnosti se již k určení DMP začínají používat optické metody měření deformace jako je např. systém **ARGUS**.

4.2.3. Určování mezního stupně přetvoření

Velmi důležitým aspektem, který rozhoduje o správnosti budoucího vyhodnocení DMP, je samotná definice mezního stavu. Podle této definice se volí na testovaném vzorku měřené elementy. Mezní stav lze v oblasti velkých plastických přetvoření definovat v rozmezí meze pevnosti do okamžiku vzniku tvárného lomu. Obecně se pak volba mezního stavu z tohoto intervalu uvažuje ve vztahu k reálnému výlisku. Hranice intervalu však neposkytují příliš velký prostor pro jejich překročení. Volba meze pevnosti jako mezního stavu může znamenat nevyužití plastických vlastností testovaného materiálu. Naopak volbou vzniku trhliny se pohybujeme již na samotné hranici vzniku neopravitelného zmetku. V této souvislosti je tedy také velmi důležité respektování vlastností hlubokotažných (volba mezního stavu za mezí pevnosti) a vysokopevnostních (volba meze pevnosti) materiálů.

V minulosti byly navrženy různé metody pro stanovení předem definovaného mezního stavu. Jejich základní přehled a charakteristika je podána v tab. 4.4.

Tab. 4.4. Metody stanovení definovaného mezního stavu

| Metoda | Charakteristika metody |
|----------------------------|--|
| Metoda ekvivalentního bodu | Výběr dvou oblastí o stejném přetvoření. Pakliže v jedné z nich vznikne lom, předpokládá se mezní stav ve druhé oblasti. |
| Grafická metoda | Volí tři sousední elementy deformační sítě tak, aby středním elementem procházel budoucí lom. |
| Interpolační metoda | Obdoba grafické metody, kdy mezní přetvoření určuje interpolační polynom. |
| Výběr vhodného elementu | Měří se jeden vybraný element umístěný v počátku vzniku lomu. |
| Heckerova metoda | Výběr elementů zasažených lomem, lokálním ztenčením nebo sousedící s lomem, ale nezasažené tímto lomem ani lokálním ztenčením. |

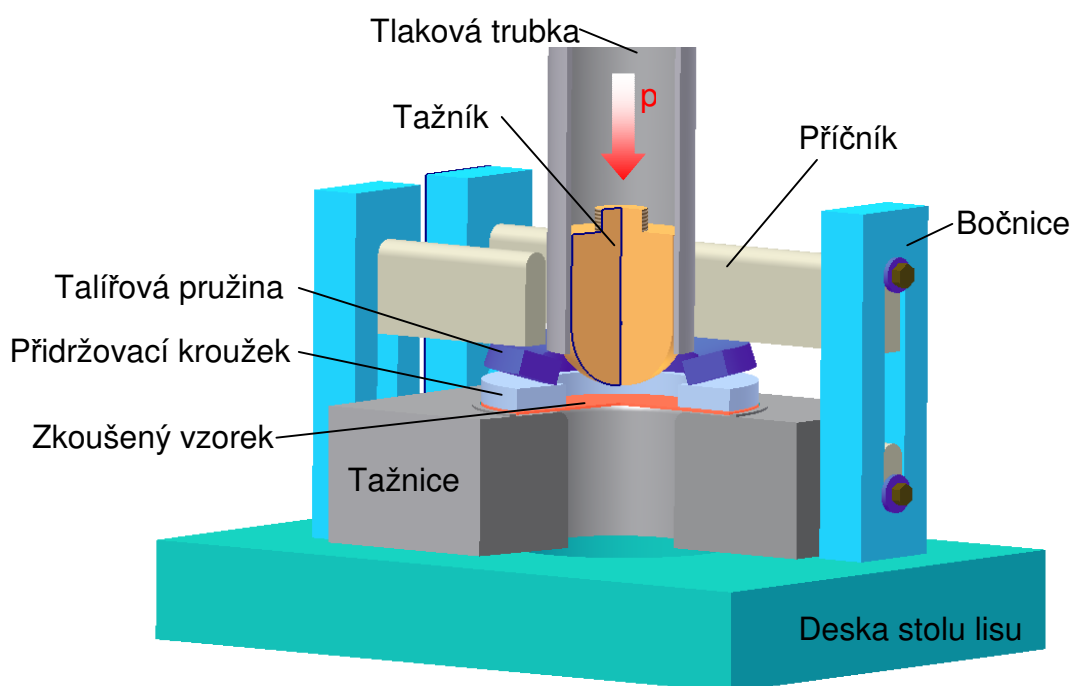
Jako nejvýhodnější v praktických podmínkách je ukazuje metoda výběru vhodných elementů v okolí lomové plochy. Samotný výběr probíhá dle respektování definice mezního stavu. Obecně může takový výběr zahrnovat elementy zasažené lomem, lokálním a difúzním ztenčením. V praxi je však využitelné přetvoření do okamžiku vzniku lokálního ztenčení, jelikož při jeho překročení dochází k prodloužení pouze na úkor tloušťky materiálu (většinou plechu).

4.3. Určování DMP za vyšších rychlostí deformace

Za normálních podmínek jsou DMP zjišťovány při rychlosti tažníků odpovídající běžným rychlostem tvářecích strojů ve strojírenském průmyslu. Této rychlosti v experimentální části odpovídá DMP měřený za podmínek označených jako **FP**, tedy rychlosti pohybu tažníku $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.

Součástí testování a zkoušení vyrobených dílů např. v automobilovém průmyslu jsou však také tzv. crash testy, které hodnotí výsledné vlastnosti materiálů i za podmínek simulujících značné namáhání. Je totiž snahou se co nejvíce přiblížit podmínkám, které odpovídají charakteru zatížení při nárazu automobilu na překážku (**bariérové testy**). Této skutečnosti by měly také odpovídat rychlosti tažníku při zjišťování samotných DMP pro vybrané materiály.

Z tohoto důvodu bylo díky velkému úsilí kolegů na Katedře strojírenské technologie TU v Liberci vyvinuto zařízení, které umožňuje měření DMP při vyšších rychlostech tažníku [27]. Jedná se o **tlakové „dělo“**, jež pomocí stlačeného vzduchu urychluje pohyb tažníku až na rychlosti odpovídající bariérovým zkouškám. Nejdůležitější částí tohoto zařízení je nástroj pro upnutí vzorku z testovaného materiálu. Je totiž nutné zabránit vtažení materiálu do nástroje pro všechny tvary vzorků, což v nástroji umožňuje talířová pružina. Nástroj je zobrazen na obr. 4.3.



Obr. 4.3. Detail upínacího nástroje [27]

Snímek celkového zařízení je vidět na obr. 4.4. Vlastní nástroj byl umístěn na hydraulickém lise CBA 300/63. Takovéto zařízení umožňuje urychlovat tažník až na výslednou rychlost $v = 50 \text{ m/s}$. Pro samotné zjišťování DMP při vyšších rychlostech tažníku se nakonec používají na Katedře strojírenské technologie TU v Liberci především podmínky odpovídající rychlostem bariérových testů čelního a bočního nárazu ($v_{2\text{ČELNÍ}} = 13,88 \text{ m/s}$ a $v_{2\text{BOČNÍ}} = 17,78 \text{ m/s}$).



Obr. 4.4. Celkové zařízení pro zjišťování DMP při vyšších rychlostech deformace

Pro experimentální část této disertační práce byla zvolena rychlost dopadu tažníku odpovídající bočnímu nárazu při bariérových testech ($v_2 = 17,78 \text{ m/s}$) a podmínky jsou označeny jako **FR**. V případě předdeformace jako **FR 13** a **FR 23**.

5. Sortiment plechů používaných pro karosářské výlisky

Stále vzrůstající požadavky kladené na plech jako konstrukční materiál nevedou samozřejmě pouze ke zvyšování tlaku na povrchové protikoroziční vrstvy plechu. Mají také za následek i stálé hledání nových typů ocelí, které umožní těmto nárokům vyhovět. Vzhledem k časté protichůdnosti požadavků automobilového průmyslu se jedná o poměrně náročný úkol.

Zmíněná protichůdnost nároků na plechy v automobilovém průmyslu spočívá na jedné straně v tlaku od ekologických skupin na snahu o snižování spotřeby paliv, což nutí konstruktéry snižovat hmotnost vozidel používáním tenčích plechů. Na druhé straně vyžaduje zlepšování bezpečnosti pasažérů zvýšením tuhosti karosérií, čehož se při menší tloušťce dá dosáhnout pouze použitím pevnějších ocelí. Jedním z hlavních současných trendů vývoje plechů používaných pro stavbu karoserie automobilů je tedy zvyšování pevnosti používaných materiálů. Zvýšení pevnostních charakteristik ovšem také zároveň vede ke snížení plastických schopností materiálu, resp. jeho tažnosti. Vývoj plechů je tedy cíleně zaměřen na zlepšení poměru tažnosti a pevnosti. Je však samozřejmě nezbytné současně respektovat i ostatní požadavky zpracovatelů plechů jako jsou např. zvýšení korozní odolnosti plechů, zaručení povrchové jakosti nebo např. recyklovatelnost vyráběných materiálů. Zde se jedná např. o technologické zásahy do výroby plechů (doválcování), které zvyšují výtěžnost a zároveň snižují energetickou náročnost. Jedním z těchto trendů je např. i tzv. feritické válcování s mazáním, což je válcování ve feritické oblasti (pod teplotou A_3).

Dalším důležitým požadavkem na plechy v automobilovém průmyslu je zvyšování životnosti karosérie, což se spolu se stálým nárůstem požadavků na plech jako na konstrukční materiál stalo hlavním důvodem používání plechů s ochrannými povlaky a to především na bázi Zn. Standardní nízkouhlíkové ocelové plechy na stavbu karoserie se dnes používají jen v malé míře. Tento trend souvisí hlavně s požadavky spotřebitelů na dobrou lisovatelnost a korozní odolnosti automobilových karosérií. Vlastní Zn povlaky jsou relativně levné a poskytují výbornou ochranu proti korozi. Na povrchu plechů se vytváří morfologie s požadovanou mikrogeometrií vzhledem ke kvalitě laku (zmenšení stop po tvářecím procesu – rýhy, škrábance atd.).

Vlastní trend vývoje ocelových plechů s přihlédnutím ke zmíněným požadavkům je popsán v následujících kapitolách.

5.1. Texturování pracovního válce

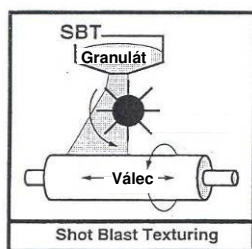
Prvotním a hlavním dojmem, který působí na zákazníka v automobilovém průmyslu, je vzhled a kvalita laku. Tento výsledný stav laku je vysoce ovlivněn morfologií povrchu použitého plechu. Samotné metody texturování pracovního válce se dají rozlišit na již klasické opracování povrchu pracovních válců a v současnosti především používané moderní způsoby texturování. Ke klasickým metodám patří způsob mechanického otryskávání jemnozrnným granulátem (označení **SBT** – **Shot Blast Texturing**) a opracování pomocí elektrojiskrového výboje (označení **EDT** – **Electric Discharge Texturing**). Do skupiny moderních metod texturování pak patří opracování povrchu pracovního válce pomocí laserového paprsku (označení **LT** – **Laser Texturing**), elektronového paprsku (označení **EBT** – **Electron Beam Texturing**) a opracování pomocí chromování pracovního válce (označení **PRETEX** – **PREussag TEXTuring**). Specifické zvláštnosti metod texturování pracovního válce a jejich stručné schéma je vidět na obr. 5.1. a dosažitelné parametry drsnosti v tab. 5.1.

Metoda SBT používá jemnozrnný granulát, který je na rotující povrch pracovního válce vrhán lopatkovým kolem. Povrch pracovního válce je přetvářen částečnou plastickou deformací za současného deformačního zpevnění. Metoda EDT vyžaduje přesné nastavení všech parametrů tak, aby byla dosažena maximální efektivita procesu. Drsnost válce lze měnit (bez ohledu na jeho tvrdost) jen velikostí napětí a vzdáleností elektrod. Metoda LT využívá laserový paprsek, který natavuje povrch pracovního válce a roztavený kov z kráteru se zachycuje jako obruba okolo kráteru. Drsnost je potom regulována prostřednictvím energie laserového paprsku, axiálním pohybem a otáčkami dělicího kotouče. Metoda EBT spočívá v natavování povrchu pracovního válce elektronovým paprskem. Díky vakuu má okraj kráteru čistý kovový charakter bez přítomnosti oxidů a lze zaručit pravidelné uspořádání i na velkou vzdálenost. PRETEX proces texturování pracovního válce je založen na elektrolytickém vyloučení chrómu na povrchu pracovního válce.

Tab. 5.1. Dosažitelné hodnoty střední aritmetické drsnosti povrchu plechu R_a

| Texturovací metoda | SBT | EDT | LT | EBT | PRETEX |
|--------------------|-----------|----------|----------|---------|----------|
| $R_a [\mu m]$ | 1,0 ÷ 6,0 | 0,8 ÷ 10 | 0,8 ÷ 10 | 0,4 ÷ 5 | 0,2 ÷ 20 |

Metoda SBT (Shot Blast Texturing)

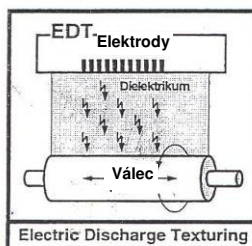


Způsob texturování: Otryskávání jemnozrnným granulátem.

Regulace drsnosti: Pomocí obvodové rychlosti tryskacího kola, velikostí tryskacího granulátu a tvrdostí pracovního válce.

Typ povrchu: Stochastický.

Metoda EDT (Electric Discharge Texturing)



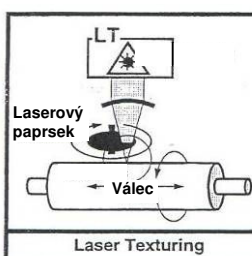
Způsob texturování: Elektrickým výbojem mezi povrchem válce a elektrodou v dielektrickém prostředí.

Regulace drsnosti: Dle velikosti napětí a vzdáleností elektrod.

Typ povrchu: Stochastický.

Ostatní: Oproti SBT lze dosáhnout nižší drsnosti.

Metoda LT (Laser Texturing)



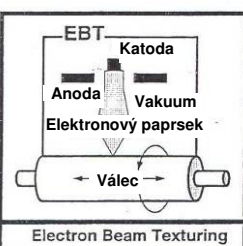
Způsob texturování: Laserovým paprskem.

Regulace drsnosti: Pomocí energie laserového paprsku, axiálním pohybem a otáčkami dělicího kotouče.

Typ povrchu: (Semi)deterministický.

Ostatní: Zejména pro křehké kráterové hrany, nízkou účinnost a vysokou nákladovost nenašla tato metoda širší uplatnění.

Metoda EBT (Electron Beam Texturing)



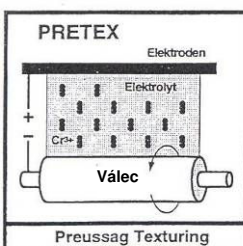
Způsob texturování: Elektronovým paprskem.

Regulace drsnosti: Pomocí otáčení válce a frekvencí elektronového paprsku.

Typ povrchu: Deterministický.

Ostatní: Lze zabezpečit pravidelné uspořádání kráterů i na velké vzdálenosti.

Metoda PRETEX (Preussag Texturing)



Způsob texturování: Elektrolytické vyloučení chrómu na povrch pracovního válce.

Regulace drsnosti: Dle chromového elektrolytu tvořícího anodovou klec.

Typ povrchu: Stochastický.

Obr. 5.1. Metody texturování pracovního válce [28]

5.2. Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem

Jedná se o plechy, které ještě donedávna byly hlavním materiálem pro stavbu karosérií. Jejich výborná tváritelnost je předurčuje pro tvarově složité výlisky hlavně pro povrchové díly, kde jsou mimo mechanických vlastností kladeny také vysoké nároky na povrchové charakteristiky (především čistotu a mikrogeometrii). Velký rozvoj počítačové simulace si v poslední době vynutil přesnou specifikaci jejich vlastností (viz tab. 5.2.), které se dají využít už v počátečních stádiích návrhu. Hlavní skupiny specifikací lze potom tedy rozdělit na [29]:

CQ (Commerical Quality) – plechy běžné kvality,

DQ (Drawing Quality) – plechy vhodné pro tažení,

DDQ (Deep Drawing Quality) – plechy pro hluboké tažení,

EDDQ (Extra Deep Drawing Quality) – zvlášť hlubokotažné plechy,

EDDQ – S (Super EDDQ) – super hlubokotažné plechy (spíše již IF ocele).

Tab. 5.2. Charakteristické vlastnosti hlubokotažných ocelí

| Skupina | $R_{p0,2}$ [MPa] | A_{80mm} [%] | r_α [-] | n [-] | $R_m/R_{p0,2}$ [-] | KUT [-] |
|----------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| DX 51 D (CQ) | 240-260 | 26-30 | 1,0-1,2 | 0,14-0,16 | 1,2-1,3 | 30-40 |
| DX 52 D (DQ) | 220-240 | 30-36 | 1,2-1,4 | 0,16-0,18 | 1,3-1,4 | 40-50 |
| DX 53 D (DDQ) | 200-220 | 36-38 | 1,4-1,6 | 0,18-0,20 | 1,4-1,5 | 50-57 |
| DX 54 D (EDDQ) | 180-200 | 38-40 | 1,6-1,8 | 0,20-0,22 | 1,5-1,67 | 57-67 |
| DX 56 D (EDDQ-S) | <180 | > 40 | >1,8 | >0,22 | >1,67 | >67 |

Tyto ocele se pro zvýšení pevnosti legují P (tzv. refosforizované ocele) a nebo se mikrolegují Mn, Si, Al, V, Ti apod. (mikrolegované ocele). V důsledku složitých teplotních procesů v pozinkovací lince však především žárově pozinkované hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem podléhají stárnutí a tedy i změnám mechanických vlastností. Stupeň tváritelnosti potom není vyšší než zaručuje skupina DDQ. Jako důsledek byly následně vyvinuty ocele bez intersticií, tzv. **IF ocele**.

5.3. IF ocele bez intersticií (Interstitials Free)

Velmi nízký obsah intersticiálně rozpuštěného uhlíku a dusíku (řádově desítky ppm) je základním aspektem charakteru těchto ocelí. Ve svém důsledku zaručuje tomuto druhu ocelí výbornou tvářitelnost, ale poměrně nízké hodnoty pevnostních materiálových charakteristik. Zbytkový obsah uhlíku, popř. dusíku, je zde vázán na legury Ti resp. Nb.

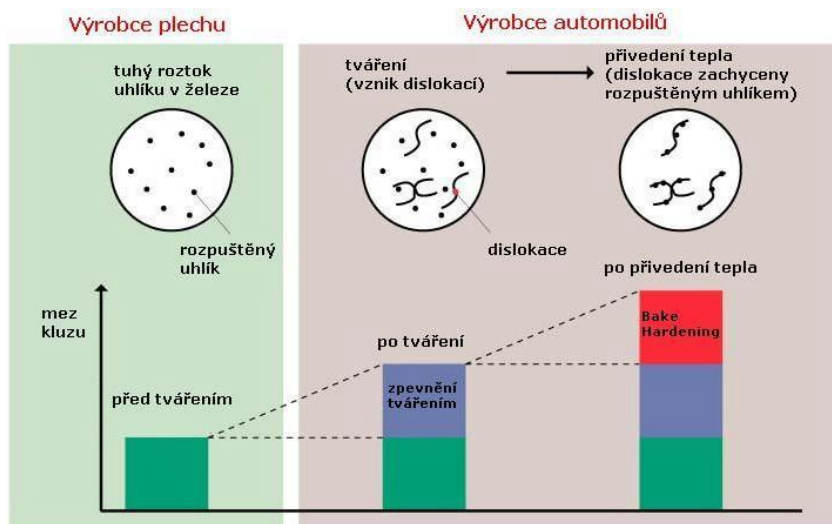
U těchto druhů ocelí dochází ke vzniku karbidů legur (TiCN , NbCN) pomocí vzájemných vazeb atomů C a N na atomy těchto legur. Dochází tak ke zvýšení pevnostních charakteristik při současném zachování poměrně dobrých charakteristik plastičnosti. Plechy z IF ocelí se po válcování za studena vyznačují vynikající kombinací mechanických vlastností, jako jsou tvářitelnost a deformační zpevnění. Jsou téměř zcela odolné proti stárnutí materiálu i při žárovém pozinkování nebo kontinuálním žíhání. Podmínky jejich výroby představují vakuování tekuté ocele, snížení obsahu C a N a mikrolegování Ti a Nb za účelem vyvázání zbytkových množství C a N. Plechy z IF ocelí se v současnosti používají na výrobu tvarově složitých dílů jako jsou blatníky, kryty dveří apod. Hlavními výrobci plechů z IF ocelí jsou firmy Salzgitter Stahl GmbH a Voest Alpine Eurostahl GmbH.

5.4. IF ocele s BH efektem (Bake Hardening)

Nevýhodou klasických IF ocelí bez intersticií z hlediska odporu proti porušení je nízká mez kluzu. Pro eliminaci tohoto nežádoucího jevu byly vyvinuty IF ocele vykazující **BH efekt** (**B**ake **H**ardening). Jedná se o jev, který spočívá ve zvýšení meze kluzu při teplotě vypalování laku karoserie. Schematické znázornění BH efektu je na obr. 5.2. Samotná velikost zpevnění závisí především na obsahu C, Mn a S. Dále závisí na historii tváření a na parametrech rekrystalizačního žíhání. Podle výše uvedených vlivů může dojít ke zvýšení meze kluzu o 30 až 80 MPa. IF ocele s BH efektem se s výhodou používají převážně na výrobu vnějších dílů karoserie např. střecha, víko kufru, kapota apod.

Z hlediska BH efektu rozlišujeme dva základní typy ocelí a to:

- ocele se zvýšeným obsahem C
- ocele se zvýšeným obsahem Ti resp. Nb



Obr. 5.2. Schéma BH efektu pro IF ocele

5.4.1. BH ocele se zvýšeným obsahem C

Množství legujících prvků Ti a Nb je u tohoto druhu ocelí pouze na takové úrovni, aby část intersticiálně rozpuštěného uhlíku ve feritové mřížce zůstala i po válcování za tepla nevázaná na vzniklé karbidy legur. K BH efektu potom dochází při nižších teplotách vypalování laku nebo žíhání. Vlastní proces zpevnění je způsoben skutečností, že během tepelného procesu vypalování laku dochází k blokování pohybu dislokací uvolněných z intersticiálních atmosfér během plastické deformace pomocí zpětné difuze atomů C a N. Výsledně tedy roste napětí potřebné pro pohyb dislokací. Jelikož v tuhém roztoku existuje určité množství nevázaného uhlíku, nelze ani dosáhnout vysoké hlubokotažnosti tohoto materiálu. Tyto ocele mají nižší koeficient normálové anizotropie r_α než konvenční plechy z IF ocelí.

5.4.2. BH ocele se zvýšeným obsahem Ti resp. Nb

Vynikající hlubokotažnost těchto druhů ocelí je dána především skutečností, že intersticiální uhlík v tuhém roztoku se během procesu tváření prakticky nevyskytuje. Pro vytvrzovací efekt během procesu vypalování laku je však C potřebný a získává se rozpuštěním karbonitridických precipitátů při vysokoteplotním žíhání na kontinuální žíhací lince a následným rychlým ochlazením. Výsledné vytvrzení je tím větší, čím vyšší je žíhací teplota a rychlost ochlazení. Výroba i použití těchto ocelí je energeticky nákladnější než u ocelí s vyšším obsahem uhlíku.

5.5. Pevnostní plechy

Pevnostní materiály a jejich použití pro stavbu karoserie osobních automobilů je dáno především snahou zvyšovat bezpečnost cestujících na jedné straně a tlakem na snižování hmotnosti karoserie na straně druhé. Redukce hmotnosti (a následně tedy také úspora spotřeby automobilu) se obecně dociluje především používáním plechů menších tloušťek.

Vývoj vysokopevnostních materiálů se zaměřuje především na využití rozdílných mechanismů zpevnění. Jedná se především o zpevnění tuhého roztoku, precipitační zpevnění, deformační zpevnění a transformační zpevnění. Vhodné kombinace pevnostních charakteristik a tažnosti daného materiálu poskytuje především zpevnění tuhého roztoku, kde je vlastní zpevnění způsobeno nutností překonání napěťových polí v okolí přísadových prvků k pohybu dislokací. V poslední době zaznamenávají velký nárůst aplikací především vysokomanganové IF ocele typu Mn-Nb-Ti, jelikož jejich výsledné vlastnosti dosahují poměrně vysoké tažnosti a také exponent deformačního zpevnění n .

V popředí zájmu zpracovatelů stojí DP ocele, TRIP ocele, CP ocele a termomechanicky zpracované nízkolegované ocele. V posledních letech se dostávají v povědomost odborné veřejnosti také tzv. TWIP ocele, které jsou předmětem zájmu této disertační práce.

5.5.1. DP ocele (Dual Phase - dvoufázové ocele)

Základem těchto ocelí je přítomnost měkké fáze, která ve své podstatě zaručuje určitou míru tažnosti a také tvrdé složky, která poskytuje výsledné vysoké hodnoty pevnostních charakteristik. V tomto případě se jedná o ocele s nízkým obsahem C na bázi Mn-Si se strukturou tvořenou měkkou feritickou maticí, ve které se nacházejí malé oblasti tvrdého martenzitu, které mohou obsahovat určitý podíl zbytkového austenitu. Dobrá tvářitelnost je tedy zaručena feritickou maticí, zatímco výsledná pevnost (500÷600) MPa je dána ostrůvky martenzitu. Množství martenzitu by se mělo pohybovat v rozmezí (10÷35)%. Nižší poměr $R_m/R_{p0,2}$ ulehčuje technologii tváření. Jednou z důležitých charakteristik je vysoká míra zpevnění při tváření za studena a to již při malých stupních deformace. DP ocele jsou typické pro výrobu disků kol.

5.5.2. CP ocele (Complex Phase – vícefázové ocele)

Tento speciální druh ocelí využívá pro zvýšení svých mechanických vlastností tzv. strukturního zpevnění jednotlivých složek. Podstatou tohoto mechanismu zpevnění je skutečnost, že hranice jednotlivých zrn jsou další, velmi výraznou překážkou volného pohybu dislokací v materiálu. Zjemňování zrna (zvyšování počtu hranic těchto zrn a také tedy množství překážek pro pohyb dislokací) je základem tohoto druhu ocelí. Výsledně se jedná o cílené zavádění různých strukturních složek do základní kovové matrice tak, aby jejich rozložení bylo co nejrovnoměrnější. Tyto strukturní složky se liší nejenom svojí tvrdostí, ale např. také disperzitou. Vhodným deformačně-tepelným zpracováváním takto získané struktury se posléze dosahuje vzniku vícefázových ocelí s pevností až 1100 MPa. I přes svoji velmi jemnozrnnou strukturu materiálu nemají příliš vysokou kapacitu deformačního zpevnění. Vyrábějí se i vícefázové ocele s BH efektem. Zde představuje nárůst meze kluzu až 115 MPa. Velmi výhodnou charakteristikou těchto ocelí je jejich schopnost dobře odolávat dynamickému zatížení.

5.5.3. MS ocele (Martensite Steels - martenzitické ocele)

Tento druh ocelí svojí podstatou dosahuje značně vysokých pevnostních hodnot, jejich tažnost je však velmi omezená. V tomto případě se totiž jedná o využití martenzitické struktury jako složky, která zajistí dosažení vysokých hodnot pevnosti. Jejich základem jsou feriticko-perlitické ocele, kde se pomocí snížení válcovací teploty získává feriticko-bainitickou strukturu s pevností až 650 MPa. Neustálým snižováním teploty a naopak zvýšením deformace lze výsledně dosáhnout převážně martenzitické struktury, jejíž pevnost se pohybuje až kolem 1300 MPa.

Zcela martenzitická struktura dosahuje pevností velmi často převyšujících hranici 1400 MPa. Velkou nevýhodou tohoto druhu ocelí jsou však jejich plastické vlastnosti. Tvářitelnost za studena je totiž značně omezena, protože ve výsledné struktuře martenzitických ocelí se samozřejmě vyskytuje převážně martenzit. Feritická fáze (jako část zajišťující alespoň určitou míru tažnosti) zaujímá jen velmi malé oblasti. Výsledná míra tažnosti je tedy dána pouze procentuálním podílem obsahu feritu v martenzitické základní struktuře.

5.5.4. TRIP ocele (oceľe s transformačně indukovanou plasticitou)

TRIP ocele (**TR**ansformation **I**nduced **P**lasticity – transformačně indukovaná plasticita) jsou představitelem materiálu, který svými vlastnostmi dokáže vyplnit prázdná místa v charakteristice tažnost – pevnost. Jejich podobnost ohledně svého názvu s TWIP oceľemi není náhodná. Oba tyto druhy oceľí jsou vysoce legovány především **Mn**, **Si** a **Al**. Po válcování se prudce ochladí na vzduchu a vhodně tepelně zpracují. Výchozí struktura TRIP oceľí je po takovémto tepelně deformačním cyklu tvořena feriticko–bainitickou maticí s určitým podílem zbytkového austenitu (6÷10)%, který transformuje na martenzit až během následné deformace při tváření. Odtud tedy plyne samotné označení TRIP oceľí. Především v německy mluvících oblastech je tento druh oceľí občas značen jako RAK (viz obr. 6.2.). Po tváření mohou TRIP ocele dosahovat pevnosti až 900 MPa. V automobilovém průmyslu se používají především na díly, které ovlivňují průběh bariérových zkoušek (crash testů). Ve stavebním průmyslu nalézají uplatnění při stavbě mostů, tunelů nebo různých budov.

5.6. Rozdělení materiálů používaných pro stavbu karoserie

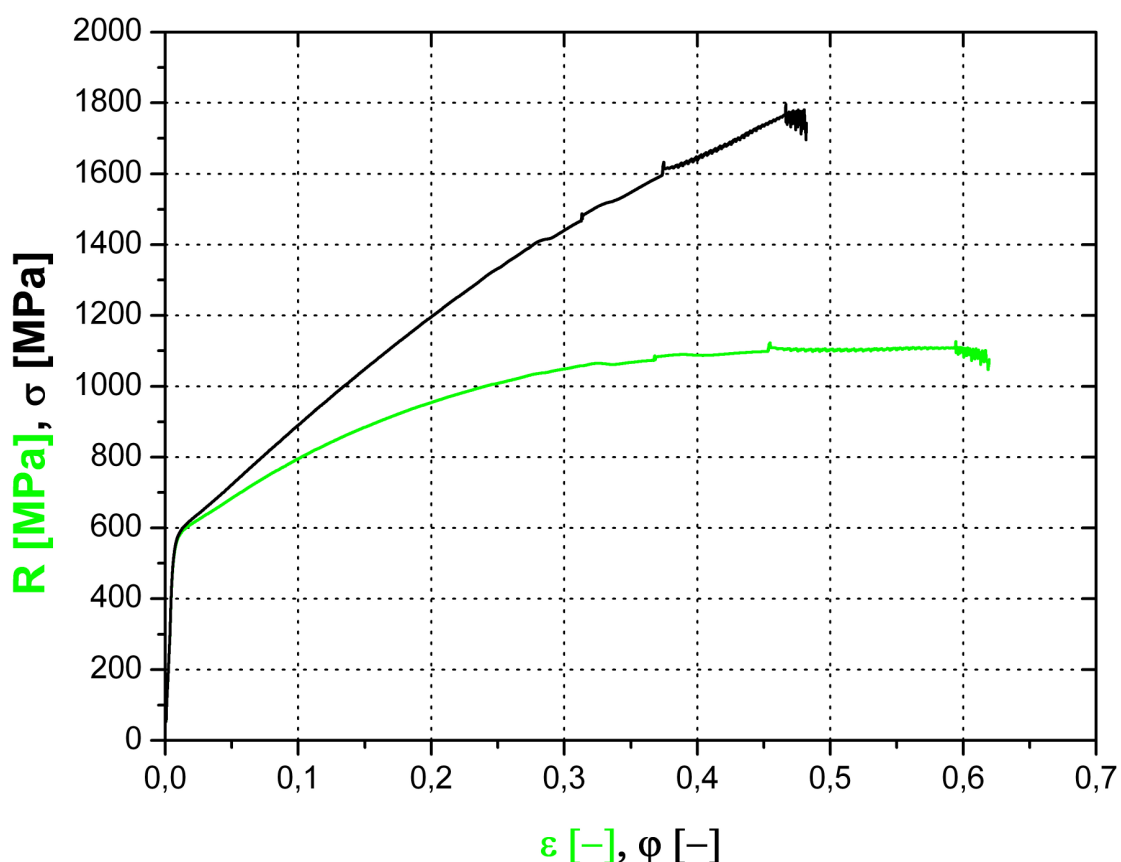
Řada autorů zabývajících se ve svých pracích materiály se zvýšenými pevnostními charakteristikami je při klasifikaci těchto materiálů do skupin dle pevnosti obecně nejednotná. Pro teoretickou správnost je však nutné si uvědomit, že pojmy jako vysokopevné a ultrapevné materiály v sobě mohou zahrnovat různé typy výše uvedených oceľí bez ohledu na jejich složení nebo výrobu. V tab. 5.3. je uvedeno rozdělení oceľí podle velikosti meze kluzu s možnostmi zastoupení jednotlivých typů oceľí tak, jak je prezentováno asociací ULSAB.

Tab. 5.3. Rozdělení oceľí podle meze kluzu

| $R_{p0,2}$ [MPa] | Název skupiny | Zástupci |
|---------------------|------------------------------|---------------------|
| ≤ 210 | Hlubokotažné (nizkouglikové) | EDDQ – S, EDDQ, DDQ |
| (210 ÷ 550) | Vysokopevnostní | IF, BH, TRIP, DP |
| ≥ 550 | Ultrapevnostní | TWIP, TRIP, CP, MS |

6. Ocele vykazující TWIP efekt

Materiál označovaný jako TWIP (**T**winning Induced **P**lasticity) je jednou z novinek, která vyplývá z požadavků zpracovatelů plechů na materiály o vysokých hodnotách pevnosti a tažnosti spolu s nízkou měrnou hmotností. Takovéto materiály obsahují prvky stabilizující austenit (převážně **Mn** nebo méně často Ni) a vykazují velmi nízkou energii vrstevné chyby (**SFE** – **S**tacking **F**ault **E**nergy) za pokojové teploty. V důsledku této skutečnosti nastává v materiálu mechanické dvojčatění spolu se zvyšující se deformací, které probíhá zároveň s deformací skluzem. Dohází k tzv. **TWIP efektu** – plasticita indukovaná dvojčatěním [30]. Ohromný zájem zpracovatelů plechů (převážně v automobilovém průmyslu) o snížení energie vrstevné chyby materiálu spočívá ve schopnosti takovýchto materiálů dosahovat výborné tažnosti (**A_x**), vysokých pevnostních hodnot (**R_{p0,2}** a **R_m**) a exponentu deformačního zpevnění **n**. Neobvykle vysoké hodnoty tažnosti v kombinaci s mechanickými hodnotami jsou tedy zajištěny silným dvojčatěním v austenitické matici během deformace. Na obr. 6.1. je ukázka zkoušky tahem pro materiál označený **TWIP 1200** (vzorek 0-5).



Obr. 6.1. Ukázka zkoušky tahem (**R- ϵ** , σ - ϕ) pro **TWIP** materiál

Je zřejmé, že vysoká tažnost spolu s vysokou pevností těchto nově vyvinutých (a stále spíše vyvíjených) TWIP ocelí legovaných lehkými kovy může poměrně výrazně zlepšit odolnost karoserie automobilu během crash testů. Při výrobě materiálu vykazujícího TWIP efekt se samozřejmě berou v úvahu legující prvky ovlivňující především proces stabilizace austenitu a snižování SFE. Nejdůležitějším z nich je Mn, používají se však také jiné prvky [31].

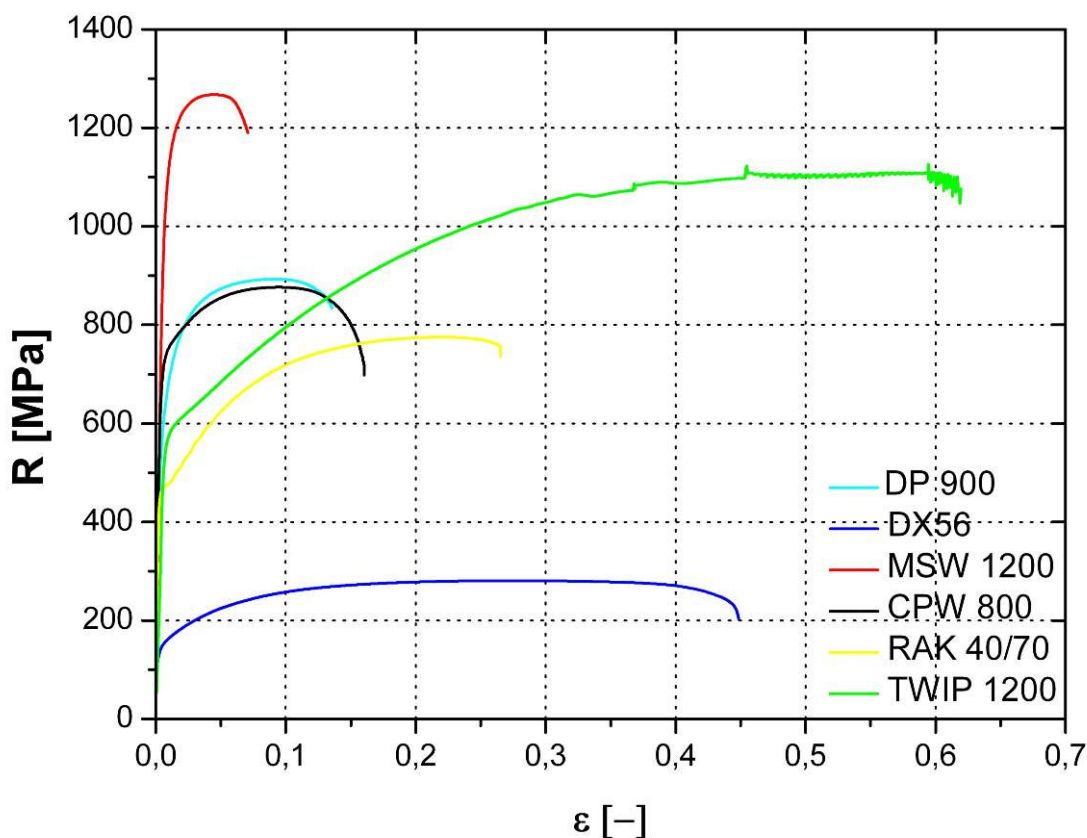
Tab. 6.1. Hlavní legující a přísadové prvky s ohledem na **TWIP efekt**

| Značka prvku | Hlavní charakteristika legování s ohledem na TWIP efekt |
|--------------|---|
| Mn | Rozhodující prvek při stabilizaci austenitu. Jeho podíl ve struktuře určuje také velikost SFE. |
| C | Stabilizuje austenit zvyšováním energie vrstevné chyby (SFE), zabraňuje vytvoření ϵ -martenzitu. |
| Si | Zjemňuje ϵ -martenzit, ačkoliv nedochází ke zlepšení tažnosti. |
| Al | Zvyšuje SFE a potlačuje vznik ϵ -martenzitu. Dochází také ke zlepšení tvárnosti za nižších teplot. |
| B, Ti, Zr | Zlepšují tvárnost za vyšších teplot. |
| N | Velmi efektivní zpevňující element v austenitu a dochází také k redukci objemového podílu ϵ -martenzitu. |

Vyjímečná tvářitelnost umožňuje hluboké tažení a lisování částí složitých tvarů za pokojové teploty. Snížení **měrné hmotnosti** (výkon motoru na 1 kg automobilu) vede k celkovému snížení hmotnosti karoserie. Za možné budoucí aplikace tohoto druhu materiálu lze pak považovat především plechy pro výlisky karosářského typu a vyztužující části karoserie (nosné profily a sloupky). Značný zájem strojírenského průmyslu (především automobilek) po takovémto druhu ocelí v současné fázi však s sebou přináší i některá úskalí. Jedná se hlavně o stále ještě značnou neznalost chování tohoto materiálu za různých podmínek. A je snahou této disertační práce přispět k lepšímu poznání chování TWIP materiálů a jeho budoucích dopadů na současný průmysl. Zařazení materiálu vykazujícího TWIP efekt do některé skupiny ocelí používaných ve strojírenství je poměrně obtížné. Lze jej označit za vysokopevnostní materiál, ale jeho vlastnosti (především tažnost) a velice široká škála možných TWIP ocelí řadí tento druh materiálu spíše k hlubokotažným materiálům. Obecně se jedná o vysokopevnostní materiál, který však vykazuje neobyčejně vysoké hodnoty tažnosti a deformačního zpevnění.

Z obr. 6.2. jsou patrné velice zajímavé mechanické vlastnosti TWIP materiálů. Jedná se o srovnání výsledků zkoušky tahem hlavních typů ocelí používaných ke stavbě karoserie (jak hlubokotažné, tak i vysokopevnostní). Pro všechny vzorky byla měřena $R_{p0,2}$, R_m a A_{80mm} . Směr odebrání představoval 0° vůči směru válcování. Je patrná jedna z velkých výhod TWIP ocelí a sice značná velikost absorbované energie během zkoušky tahem. Plocha pod křivkou tahem vykazuje excelentní velikost houževnatosti tohoto materiálu s výbornou kombinací tažnosti a pevnostních hodnot, která převyšuje ostatní hlavní druhy ocelí používaných především v automobilovém průmyslu.

Z tvaru křivky zpevnění vyplývá také další poměrně důležitá vlastnost TWIP materiálů. Jedná se o velikost homogenní tažnosti A_g , která je většinou shodná s výslednou celkovou tažností A_x . Lze tedy předpokládat $A_g \approx A_x$. Ukazuje se, že masivní dvojčatění má za následek vysoké zpevnění materiálu, což ve svém důsledku vede k potlačení tvorby krčku během zkoušky tahem. Zjištění velikosti exponentu deformačního zpevnění n a také modulu monotónního zpevnění C je následně jedním z hlavních experimentálních cílů této práce.



Obr. 6.2. Ukázka zkoušky tahem pro různé materiály

Srovnání jednotlivých materiálů pomocí jejich křivek zpevnění ukazuje výjimečnost chování materiálu TWIP 1200, který vykazuje výborné hodnoty podle obou hlavních hledisek, dle kterých se použité materiály především rozlišují. Konkrétně se jedná o hlubokotažné a vysokopevnostní materiály.

Ze srovnání s hlubokotažnými materiály (na obrázku je představuje materiál DX56) se ukazuje, že celková tažnost je obecně velmi vysoká pro oba srovnávané materiály, kdy však TWIP materiál vykazuje zhruba o 10% vyšší hodnotu. Porovnání z hlediska pevnostních mechanických hodnot pak velmi upřednostňuje TWIP ocele, kde je patrná výrazná zásoba plasticity. Mez kluzu pro tento materiál je pak srovnatelná oproti vysokopevnostním ocelím.

Je patrné, že pro TWIP ocele představuje hodnota meze pevnosti R_m oblast zhruba kolem 1200 MPa. S takovou hodnotou se mohou srovnávat pouze vysokopevnostní martenzitické ocele (MSW 1200). Velikost tažnosti srovnávaných materiálů je pak pro TWIP ocele nezvykle vysoká a to zejména s ohledem na pevnostní hodnoty tohoto materiálu. Ostatní vysokopevnostní materiály mají tažnost A_{80mm} zhruba v intervalu 5÷15%, materiál TWIP 1200 dosahuje hodnot přes 60%. Lze tedy opět zdůraznit velmi dobrou kombinaci pevnostních hodnot a tažnosti pro TWIP ocele a také značně širokou možnost nabídky velikosti hodnot a kombinací těchto mechanických charakteristik materiálů od samotných výrobců plechů. Jedná se tedy o zcela výjimečný materiál s možnou širokou škálou sortimentu.

Budoucí širší uplatnění těchto plechů se však odvíjí z hlubšího poznání jejich chování. V současné době již existují automobilky, které v počátečních stádiích návrhu karoserie v předseriesové výrobě vyzkoušely tento materiál. Výsledky tohoto testování jsou však předmětem utajení znalostí a poznání těchto automobilek. Přesto lze z určitých náznaků a jednotlivých jednání vyzorovat jisté zklamání ohledně budoucího širšího nasazení tohoto materiálu do výroby. Jedná se patrně především o negativní zkušenost ohledně vlivu teplotního zatížení na tento materiál, která může vést ke zkřehnutí TWIP materiálu a následným velmi špatným výsledkům při crash testech. Na základě těchto zkušeností při jednání se zástupci automobilek byla do experimentální části také zařazena simulace vlivu procesu vypalování laku (170 °C po dobu 20 min) na následné vlastnosti testovaného materiálu. Z hlediska dalšího směřování zkoumání TWIP materiálu se předpokládá měření vlivu lokalizovaného teplotního zatížení v důsledku bodového svařování. Dalším velmi důležitým úkolem se ukazuje také měření vlivu předdeformace na následné vlastnosti TWIP materiálu.

6.1. Fyzikální modelování TWIP efektu

Potřeba fyzikálně popsat proces mechanického dvojčatění a tedy i tzv. TWIP efekt je dána zejména vývojem těchto materiálů a také tedy snahou modelovat jejich chování a vlastnosti. Domnívám se, že až do nedávné doby nebyla této problematice věnována dostatečná pozornost, jelikož neexistovala potřeba především strojírenského průmyslu blíže popsat TWIP efekt. Z tohoto důvodu jsou veškeré poznatky ohledně tohoto jevu získané v několika posledních letech.

Jak již bylo napsáno, základem TWIP efektu je stabilizace austenitu (zejména pomocí Mn) a snížení energie vrstevné chyby – **SFE**. V důsledku těchto předpokladů dochází v materiálu k mechanickému dvojčatění současně se skluzem dislokací. Jelikož s rostoucí deformací se také zvyšuje podíl dvojčat v objemu materiálu, velmi výrazně klesá tzv. střední volná dráha dislokací **Λ (MFP – Mean Free Path of Dislocations)** a dochází tak k výraznému zpevňování materiálu díky mechanickému dvojčatění – **TWIP efektu** [32]. Tato skutečnost má za následek vysokou tažnost materiálů (**$A_{50mm} \approx 60\%$**) a také vysokou mez pevnosti (**$R_m \approx 1200 \text{ MPa}$**). Obě hodnoty platí pro testovaný materiál označený jako **TWIP 1200**.

K popsání změny volné dráhy dislokací (MFP), která ve svém důsledku vede k výraznému nárůstu zpevnění, bylo navrženo několik přístupů. Lze však říci, že jejich obecným základem je předpoklad přítomnosti dvojčete jako velmi silné a neproniknutelné překážky vůči pohybu dislokací skluzem. Ve výsledném vzorci se tedy téměř vždy nakonec objeví části zohledňující rozdílné hlavní překážky pro pohyb dislokací (hranice zrn, dvojčata a dislokační les).

MFP bez dvojčatění se dá podle [33] spočítat jako:

$$\frac{1}{\Lambda_i} = \frac{1}{D} + k \sqrt{A_{ij} \cdot \rho_j} \quad (74)$$

kde: D – velikost zrna,

k – konstanta, která charakterizuje zpevňování mezi hranicemi zrn a dislokačním lesem,

$[A]$ – Franciosiho interakční skluzová symetrická matice (24x24),

ρ_j - hustota dislokací.

K popsání **MFP při dvojčatění** je třeba zavést 12 systémů dvojčatění, které se mohou objevit v FCC mřížce. Jsou popsány pomocí Schmidova faktoru m_{ij} a jejich parciálním objemovým podílem f_i . Jak je vidět v kap. 7.2.3., mikrodvojčata se hromadí do určitých vrstev, která jsou stejně velkou překážkou pro skluz dislokací jako hranice zrn. Pro daný skluzový systém i lze pak pro MFP napsat:

$$\frac{1}{\Lambda_i} = \frac{1}{D} + \frac{1}{t_i} + k\sqrt{A_{ij} \cdot \rho_j} \quad (75)$$

kde: t_i – MFP mezi mikrodvojčaty protínající skluzový systém a lze napsat:

$$\frac{1}{t_i} = B_{ij} \cdot \frac{1}{d_j} \quad (76)$$

kde: $[B]$ – symetrická (24x12) matice interakcí systémů skluz-dvojčatění

Vzdálenost mezi rovnoběžnými vrstvami mikrodvojčat (viz obr. 7.2.) pro daný systém i lze spočítat pomocí Fullmanova vztahu:

$$\frac{1}{d_j} = \frac{f_j}{n_j e_j (1 - F)} \quad (77)$$

kde: F – celkový podíl dvojčat ve struktuře,
 n_j – průměrná hodnota počtu mikrodvojčat ve vrstvě,
 e_j – průměrná tloušťka mikrodvojčat.

Lze tedy nakonec napsat vzorec, který zahrnuje všechny hlavní překážky pohybu dislokací a určuje tak změnu MFP také při procesu dvojčatění za podmínek TWIP efektu. Výsledný navržený model na fyzikální bázi pro popsání pracovního zpevňování materiálu bere tedy v úvahu vzájemné ovlivňování mezi dvojčatěním a skluzem dislokací a podle [33] odpovídá experimentálním výsledkům statické zkoušky tahem pro feritické a austenitické ocele. Jeho výsledný tvar je:

$$\frac{1}{\Lambda_i} = \frac{1}{D} + \frac{1}{1 - F} B_{ij} \left(\frac{f_j}{n_j e_j} \right) + k\sqrt{A_{ij} \rho_j} \quad (78)$$

Předmětem zájmu studia vědců a badatelů v oblasti TWIP materiálů není samozřejmě pouze sledování pracovního zpevňování. Další velkou oblastí zájmu je ovlivnění procesu dvojčatění pomocí samotné orientace zrn díky skluzu a také dle Schmidova faktoru. Tyto výzkumy prokázaly velmi silnou vzájemnou souvislost mezi deformací skluzem a dvojčatěním [34] a potvrdily např. také, že procesu dvojčatění vždy předchází určitý skluz dislokací [15, 35]. Lze však říci, že k širšímu pochopení problematiky dvojčatění a TWIP efektu vede ještě velmi dlouhá cesta.

6.2. Role manganu (Mn) na proces dvojčatění v TWIP materiálech

Vzhledem k poměrně vysokému zastoupení a poměrně důležité roli manganu v TWIP ocelích považuji za vhodné věnovat jednu kapitolu právě tomuto kovovému prvku.

Austenitické ocele složené z vhodné kombinace Fe-Mn-Al-Si vykazují mechanické a technologické vlastnosti, které jsou vhodné pro vývoj a konstrukci nových typů pevnostních materiálů. Zároveň jsou však také schopné redukovat měrnou hmotnost výrobku.

Přidáváním manganu do Fe-Al ocelí se mění základní feritická struktura. Při koncentraci manganu okolo 5÷10% dochází ke vzniku duplexní α/γ struktury. Dosáhne-li hodnota koncentrace manganu zhruba 20÷30% za odpovídající koncentraci Al s určitým množstvím uhlíku, austenitická γ -fáze je plně stabilizovaná. Přidáváním Si do vysoce Mn-Al legovaných ocelí se destabilizuje austenit a klesá tak energie vrstevné chyby, což má za následek následnou martenzitickou přeměnu. Dochází k tzv. TRIP efektu a nebo se zvětšuje podíl tvorby dvojčatění ($\gamma \rightarrow \gamma_{\text{TWIN}}$), což je TWIP efekt. Záleží na poměru Mn, Al a Si ve struktuře ocelí, která ovlivňuje velikost energie vrstevné chyby. Jestliže $\gamma < 20 \text{ mJ/m}^2$ je upřednostněn TRIP efekt, při $\gamma > 20 \text{ mJ/m}^2$ dochází k dvojčatění (potlačena fázová přeměna) - TWIP efekt [36].

Lze říci, že vysoký obsah Mn ve struktuře TRIP a TWIP ocelí vykazuje velmi dobrou kombinaci zpevnění, pevnosti a tažnosti. Samotná tažnost je velmi vysoká ($A_{50\text{mm}} \approx 60\%$) zvláště ve srovnání s hodnotami ostatních vysokopevnostních materiálů, ale i při srovnání s hlubokotažnými materiály.

6.3. Základní charakteristika manganu

Z historického hlediska byl již od starověku k výrobě skla používán tzv. **burel**, což je oxid manganičitý - MnO_2 (viz obr. 6.3.). V té době byl také mylně považován za odrůdu magnetovce. Ve středověku se již začal rozlišovat rozdíl mezi magnetovcem (magnes) a burelem (pseudomagnes). Později pak skláři pojmenovali burel podle jeho schopnosti odbarvovat železnaté sklo na tzv. sklářské mýdlo a změnili jeho název na **manganes** (lapis manganensis).



Obr. 6.3. Manganová ruda pyroluzit: Burel – oxid manganičitý (MnO_2)

V přírodě se mangan nevyskytuje jako čistý kov, ale v podobě mnoha kyslíčnickových minerálů, z nichž nejdůležitější jsou šedavě černý **pyroluzit** neboli **burel (MnO_2)** a minerály podobného chemického složení jako psilomelan, wad apod. Mangan je po železe a titanu třetí nejrozšířenější kov na Zemi. V zemské kůře pak činí průměrný obsah manganu kolem 0,9 – 1 g/kg, což odpovídá 1000 ppm (parts per million – počet částic na 1 milion částic). K poznání, že burel není železnou rudou, ale že musí obsahovat i jiný (doposud neznámý) kov, se dospělo až v polovině 18. století. Jeho objevitelem se roku 1774 stal švédský chemik **Carl W. Scheele**. Ve stejném roce se také podařilo mangan izolovat **Johanem Gottliebem Gahnem** pomocí zahřívání burelu s dřevěným uhlím a olejem za vysoké teploty. V čisté podobě byl však mangan vyroben až pomocí elektrolýzy roztoků manganatých solí ve 30. letech minulého století. Od roku 1774 byl mangan nazýván manganesium, ale pro možnou záměnu s hořčíkem (Mg –magnesium) byl později přejmenován na **mangan (manganum)** [37].

Základní fyzikálně–chemické vlastnosti: mangan je světle šedý, paramagnetický kov. V nejčistším stavu je tak křehký, že se dá rozdrtit na prach, což je příčinou jeho omezené použitelnosti v čistém stavu. Patří mezi přechodové prvky, které mají valenční elektrony v d-sféře. Základní fyzikálně-chemické vlastnosti jsou potom zobrazeny v tab. 6.2.

Tab. 6.2. Základní fyzikálně-chemické vlastnosti Mn

| Fyzikálně-chemická vlastnost | Hodnota | Jednotky [x] |
|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Atomové číslo | 25 | - |
| Relativní atomová hmotnost | 54,938045 (5) | amu |
| Elektronová konfigurace | [Ar] 3d ⁵ 4s ² | - |
| Skupenství | Pevné | - |
| Atomový poloměr | 1,295 | Å |
| Typ krystalové mřížky | BCC | - |
| Teplota tání | 1519 | K |
| Teplota varu | 2334 | K |
| Hustota | 7,21 | g/cm ³ |
| Tvrdost | 6 | Mohsova stupnice |
| Měrný elektrický odpor (20 °C) | 0,185 | mΩ |

Jedná se o velice elektropozitivní prvek, který se vyskytuje ve třech stabilních modifikacích (α -mangan, β -mangan a γ -mangan) v závislosti na teplotě (viz tab. 6.3.). První dvě modifikace jsou křehké a tvrdé vznikající při aluminotermické výrobě manganu. Třetí je měkká a tažná a vzniká při elektrolytickém vylučování manganu. Čtvrtá modifikace (δ - mangan) je nestabilní modifikací.

Tab. 6.3. Modifikace Mn v závislosti na teplotě

| Modifikace | Stabilní / nestabilní typ modifikace | Rozmezí teplot stability [°C] |
|------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| α -mangan | Stabilní | pokojová teplota |
| β -mangan | Stabilní | 724 ÷ 1070 |
| γ -mangan | Stabilní | 1070 ÷ 1160 |
| δ -mangan | Nestabilní | > 1160 |

Ve sloučeninách se mangan vyskytuje v řadě mocností od Mn^{+1} až po Mn^{+7} . Nejčastější jsou však sloučeniny manganu Mn^{+2} (nerost manganosit - oxid manganatý MnO , minerál dialogit – uhličitán manganatý $MnCO_3$ atd.), Mn^{+4} (již zmíněný burel – MnO_2 , nerost hausmannit – manganičitan manganatý Mn_3O_4 atd.) a Mn^{+7} (oxid manganistý Mn_2O_7 , manganistan draselný $KMnO_4$ atd.). S rostoucím

oxidačním číslem klesá zásaditost prvku a stoupá kyselost. Mangan se v některých svých vlastnostech i sloučeninách velmi podobá prvkům a sloučeninám sedmé hlavní podskupiny – halogenidům (zejména pak chloru). Na vzduchu je mangan za obvyčejné teploty stálý, za tepla se však snadno okysličuje. Rovněž se snadno rozpouští ve všech kyselinách.

Jeho velká afinita ke kyslíku a k síře a jeho vlastnost tvořit kysličníky, které přecházejí rychle a dokonale do strusky, jsou příčinou, že se mangan stal důležitým a nepostradatelným při výrobě oceli a niklu. Pro tyto vlastnosti nelze nahradit mangan žádným jiným levnějším prvkem. Afinita manganu k uhlíku a snadnost, se kterou tvoří slitiny se železem, však znesnadňují jeho výrobu v čistém stavu.

Vliv manganu jako legujícího prvku: mangan patří mezi austenitotvorné prvky. Ze stavového diagramu Fe-Mn lze určit, že ve slitinách obsahujících více než 35% manganu zůstává austenit zachován i při pokojové teplotě a slitiny mají austenitickou, nemagnetickou strukturu. Mangan má malou difúzní rychlost. Ve slitinách Fe-Mn-C je část manganu rozpuštěna v základní kovové matici (tj. ve feritu nebo austenitu), část tvoří podvojný karbid $(\text{Fe,Mn})_{23}\text{C}$. Mangan rozpuštěný ve feritu zvyšuje jeho pevnostní vlastnosti a snižuje tažnost. V rovnovážném diagramu Fe-Fe₃C posouvá bod E doprava, tj. zvyšuje rozpustnost uhlíku v austenitu. Bod S posouvá doleva, takže nízkolegované ocele mají čistě perlitickou strukturu při nižším obsahu uhlíku než nelegované ocele. Protože se eutektoidní teplota současně snižuje a zjemňují se lamely perlitu, zvyšuje se také pevnost.

Mangan ovlivňuje také tepelné zpracování ocelí. Se stoupajícím obsahem manganu se zpomaluje transformace austenitu v perlitické i bainitické oblasti. ARA křivky se posouvají doprava, takže se zvyšuje prokalitelnost. Současně s tím se také zvyšuje doba stability austenitu. Mangan zvyšuje v matici ocele s vyšším obsahem uhlíku množství zbytkového austenitu po kalení. Při vyšším obsahu uhlíku a manganu se transformace austenitu úplně potlačí a ocele mají austenitickou matici.

V ocelářském průmyslu slouží mangan především jako složka, která se váže na síru a kyslík. Slouží tedy jako desulfurační a neoxidační přísada, která převede vzniklé sloučeniny S a O₂ do strusky a vyčistí tak taveninu. Ze slitin, které obsahují mangan je nejdůležitější patrně dural (AlCu4Mg + cca 0,6% Mn). Manganové ocele jsou citlivé na zhrubnutí zrna, takže je nutné při tepelném zpracování dodržovat austenitizační teplotu. Mangan se často používá k legování konstrukčních ocelí, zejména pak v kombinaci s jinými prvky, protože je laciný a snadno dostupný.

7. Metalografické laboratorní metody

Obecně lze metalografii definovat jako nauku o struktuře kovových materiálů. Základní strukturní jednotkou v metalografii je fáze. Druh, množství, rozměry, tvar, způsob uspořádání fází a jejich některé topografické znaky patrné jako projev vnitřní stavby nebo chemické nestejnorodosti určují základní typ struktury a její specifické zvláštnosti. Při komplexním popisu je potom třeba všechny fáze identifikovat, krystalograficky definovat, stanovit jejich chemické složení a objemový podíl. K tomuto účelu slouží všechny laboratorní techniky jako konvenční i řádkovací elektronová mikroskopie, rentgenová a elektronová difrakční fázová analýza, elektronová chemická mikroanalýza, Augerova elektronová mikroanalýza i další a také metody kvantitativní metalografie uplatňované v návaznosti na světelnou a elektronovou mikroskopii a elektronovou mikroanalýzu.

V tab. 7.1. je zobrazena rozlišovací schopnost jednotlivých typů mikroskopů. Díky zavedení řádkovací elektronové mikroskopie se v posledních letech rozlišovací schopnost elektronových mikroskopů zvětšila natolik, že jimi lze získávat kvantitativní údaje o velikosti poruch a vzdálenostech mezi poruchami krystalové mřížky a o velikosti oblastí homogenních fází ve struktuře. Tyto informace byly většinou v minulých letech získávány převážně nepřímými metodami (jako např. difrakcí rentgenových paprsků, elektronů a neutronů).

Tab. 7.1. Přehled rozlišovacích schopností mikroskopů

| Druh mikroskopu | | Rozlišovací schopnost [nm] |
|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Světelný mikroskop | | 300 |
| Odrazový elektronový mikroskop | | 8 ÷ 20 |
| Emisní elektronový mikroskop | | 15 ÷ 20 |
| Řádkovací elektronový mikroskop | | 5 |
| Transmisní elektronový mikroskop | řádkovací při použití fólií | 3 |
| | konvenční při použití otisků | 1 |
| | konvenční při použití fólií | 0,3 |
| Autoemisní elektronový mikroskop | | 2 |
| Iontový mikroskop | | 0,2 |

7.1. Světelná mikroskopie

Tato metoda metalografie je založena na základech optiky. Do tzv. fyzikální optiky byla také zahrnuta interference, ohyb a polarizace světla. V poslední době se ukázalo, že viditelné světlo projevuje kvantovou povahu a je tedy vhodnější pro jevy související s vlnovým charakterem záření používat název vlnová optika.

Pro zvýšení rozlišovací schopnosti musí být kontrast obrazu dostatečný a také množství světla odražené od detailu obrazu by mělo být dostatečné. Jednou z možností je použití leptacích technik. Samo o sobě však leptání není vždy dostatečně účinné a může mít občas negativní vliv na samotnou strukturu. Proto se používá množství optických metod vedoucích ke zvýšení kontrastu. Tyto metody jsou použitelné v neleptaném i leptaném stavu a jedná se např. o následující způsoby:

Světlé pole - světelné paprsky zde dopadají na pozorovanou plochu metalografického výbrusu kolmo. Nevznikají tedy stíny a pozorovaný obraz je málo výrazný a kontrastní. Jemné strukturní části mají naopak na obraze ostré obrysy.

Temné pole – je-li osvětlovací paprsek odkloněn více od kolmého směru, nevrací se do objektivu žádné přímo odražené světlo. Vzniká tedy obraz, jehož kontrast je opačný ve srovnání se světlým polem. Detaily na výbruse působící rozptyl světelného paprsku (difúzní rozptyl) se jeví světle a jejich okolí zůstává temné.

Fázový kontrast - jedná se o interferenci fázově posunutých vln podobně jako interferenční techniky umožňující měření malých rozdílů optických drah vzniklých odrazem od nerovností povrchu nebo rozdílem indexů lomu průhledných látek.

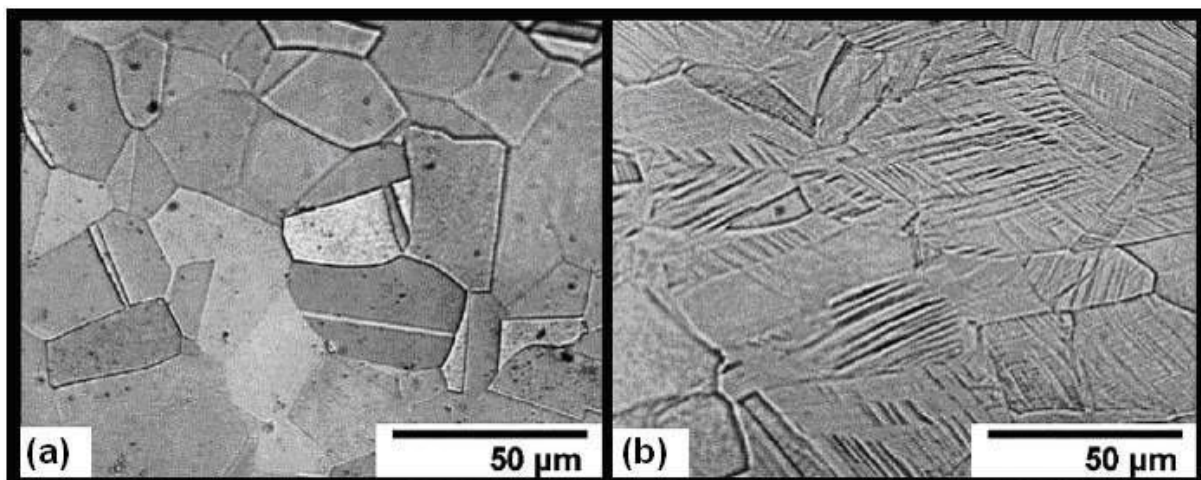
Polarizované světlo – jedná se o velice častou a účinnou metodu vedoucí ke zvýšení kontrastu. Obecně je světlo příčné elektromagnetické vlnění, v němž kmitající vektory intenzity elektrického a magnetického pole jsou vždy kolmé navzájem i na směr šíření. U denního světla a většiny druhů umělých světel jsou kmity rozloženy rovnoměrně do všech rovin procházejících paprskem. Jsou-li kmity omezeny na jednu rovinu, jedná se o lineárně polarizované světlo. Jestliže mají dvě světelné vlny vzájemně kolmé kmitové roviny, nastává tzv. eliptická polarizace a jejím zvláštním případem je kruhová polarizace, kde existuje kombinace dvou vln se stejnou amplitudou fázově posunutých o $\pi/2$ (nebo lichý násobek). V metalografické praxi se používá většinou lineárně polarizované světlo, které může vzniknout z nepolarizovaného světla odrazem, dvojlomem nebo absorpcí.

7.1.1. Světelná mikroskopie pro sledování dvojčatění

Pozorováním struktury materiálu a jeho chováním během procesu plastické deformace dvojčatěním pomocí světelné mikroskopie lze do určité míry charakterizovat proces vzniku dvojčat ve struktuře. Jedním z nejdůležitějších parametrů, které ovlivňují výslednou kvalitu snímků, je především nalezení vhodného leptadla, což v případě TWIP materiálů může občas přinést komplikace.

Po naleptání vzorků se dvojčata objeví jako velmi tenké pásy o šířce několika desítek mikrometrů. Podíl dvojčat ve struktuře narůstá se zvyšující se deformací, zatímco průměrná vzdálenost mezi nimi se vrůstající deformací klesá. Hlavním znakem procesu dvojčatění při pozorování světelnou mikroskopií je vznik jednoho nebo dvou rovnoběžných systémů pozorovatelných v zrnech základní struktury. Jeden systém je aktivován při dosažení meze kluzu, dvojčata vznikají v celém zrně a jsou blokována hranicemi zrn. Při dosažení určité deformace následuje vznik druhého systému v prostoru mezi dvojčaty prvního systému, které také tato dvojčata blokuje. Tímto způsobem dochází k vytvoření charakteristické struktury, která se označuje jako „žebříkovitý vzor“ (**ladder-like pattern**). Jestliže jsou v některém zrně aktivovány oba systémy současně, dochází k vytvoření tzv. „uchovitého vzoru“ (**ear pattern**). Tento jev je však velmi vzácný.

Na obr. 7.1. jsou potom vidět snímky při sledování deformace dvojčatěním pomocí světelné mikroskopie, kdy velikost zrna představovala přibližně 20 μm . Na obrázku jsou dobře viditelné tenké pásy dvojčat, které vytváří „žebříkovitý“ vzor.



Obr. 7.1. Mikrostruktura dvojčat při světelné mikroskopii [38]

a) nedeformovaný vzorek **b)** vzorek po deformaci

7.2. Elektronová mikroskopie

Ve dvacátých letech minulého století objevil H. Busch, že rotační magnetické pole může působit na svazek pohybujících se elektronů jako magnetická čočka a položil tím základy elektronové mikroskopii. Elektronový mikroskop je tedy založen na skutečnosti, že svazek elektronů je fokusován soustavou magnetických čoček. Podstatně vyšší rozlišovací schopnost této metody oproti světelné mikroskopii je dána podstatně kratší vlnovou délkou elektronového záření oproti vlnové délce viditelného světla. Vztah mezi urychlovacím napětím U a vlnovou délkou λ je:

$$\lambda = \frac{h}{p} \approx \frac{1,23}{\sqrt{U}} \quad (79)$$

kde: λ - vlnová délka [nm],
 h - Planckova konstanta, $h = 6,62607 \cdot 10^{-34}$ Js,
 p - hybnost elektronu [$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
 U - urychlovací napětí [kV].

7.2.1. Transmisní elektronová mikroskopie (TEM)

Při transmisní elektronové mikroskopii (**TEM – Transmission Electron Microscopy**) dochází k průchodu elektronového svazku krystalickou látkou. Na příhodně orientovaných krystalových rovinách dochází k difrakci elektronů a ke vzniku svazků difraktovaných elektronů. Pomocí budícího proudu jsou pak svazky elektronů difraktovaných na určitém systému krystalových rovin zaostřeny do ohniskové roviny objektivu. Následně tedy vzniká na fluorescenčním stínítku zvětšený difrakční obrazec. Pro přípravu preparátů se v elektronové mikroskopii využívají **otisky** neboli **repliky**, které představují kopii reliéfu povrchu vzorku. Byla ověřena řada materiálů vhodných pro zhotovení replik. V současné době se však používá převážně plastů a uhlíku. Repliky se obecně dají rozdělit na dva základní typy a to otisky povrchového reliéfu a extrakční repliky. Otisk povrchového reliéfu znamená nanesení (např. plastu) na povrch vzorku a po zaschnutí se tenká blanka strhne a v otisku zachovává topografii povrchu. Extrakční replika umožňuje získat obraz povrchového reliéfu struktury a zároveň také vyextrahovat jemné částice, které jsou v replice přítomny ve stejném množství jako na naleptaném povrchu vzorku [39].

Metody tenkých fólií následně našly uplatnění zejména díky velké výhodě oproti replikám, kterou je umožnění pozorování vnitřní struktury kovu a nejen morfologie struktury na jeho povrchu. Jedná se zejména o poruchy krystalové mřížky (dislokace, vrstevné chyby, plošné poruchy), ale také i vztahy mezi jednotlivými strukturními částicemi. Jednotlivé základní typy tenkých vrstev a způsoby jejich přípravy jsou podány v tab. 7.2.

Tab. 7.2. Přehled a charakteristika základních metod tenkých fólií

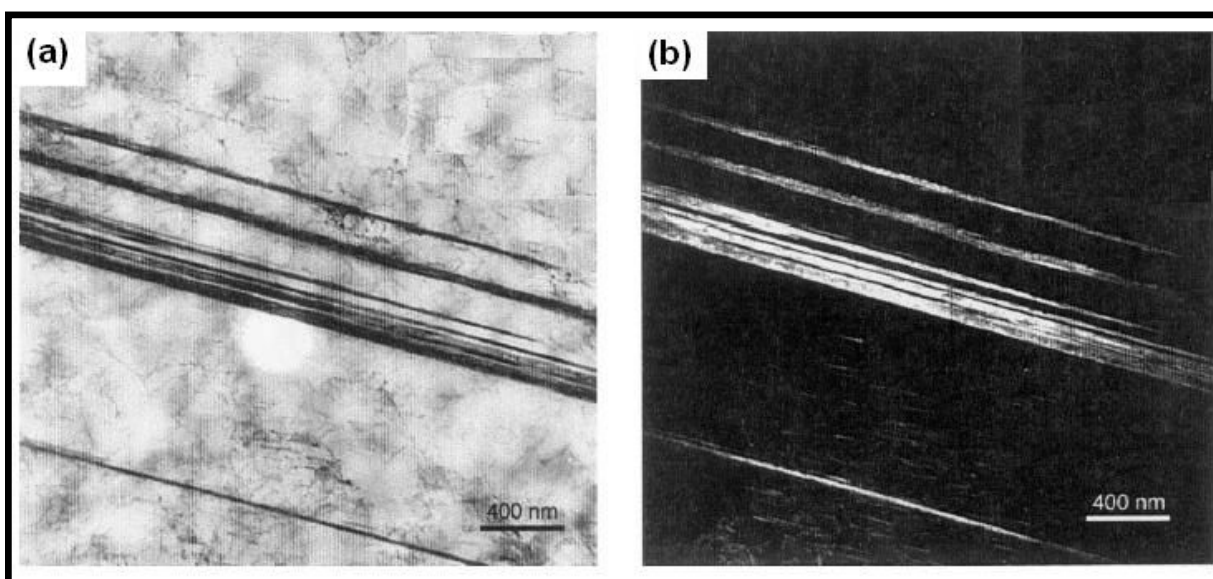
| Druh tenké vrstvy | Způsob přípravy | Základní charakteristika |
|--------------------|-----------------------------------|---|
| Fólie | Chemické ztenčování | Rozpouštění kovové matrice i sekundárních fází. |
| | | Předchází elektrolytickému doleštění (nerovný nebo oxidací porušený povrch). |
| | Elektrochemické ztenčování | Nejrozšířenější metoda. |
| | | Předchází mechanické opracování a elektrochemické leštění až do proděravění vzorku. |
| | | Okénková, Bollmanova a trysková technika. |
| | Ztenčování iontovým bombardováním | Speciální případy (většinou nekovové materiály). |
| | | Ztenčení na relativně velké ploše. |
| | | Zabraňuje vzniku oxidových vrstev produktů elektrochemické reakce. |
| | | Může ovlivnit strukturu. |
| | | Malá rychlost ztenčování. |
| | Ztenčování deformací | Velké ovlivnění struktury. |
| Tenké filmy | Vakuové napařování | Roztavení a odpaření kovu ve vakuu a jeho napaření. |
| | Tuhnutí tenké vrstvy taveniny | Nástřik kapek roztaveného kovu na studenou podložku. |
| Tenké řezy | Řezy ultramikrotomem | Řezání diamantovým nožem. Ovlivnění struktury kovu řezáním. |

7.2.2. Řádkovací elektronová mikroskopie (SEM)

Řádkovací elektronová mikroskopie (**SEM – Scanning Electron Microscopy**) se dostala do popředí zájmu jako laboratorní technika v 60. letech minulého století, kdy byl představen první řádkovací elektronový mikroskop firmy Cambridge Instrument Company. Při této metodě se jedná o postupné vytváření obrazu, které se dosahuje elektronickým (nikoli optickým) způsobem. Elektronový svazek je zde tedy spíše nástrojem k vyvolání fyzikálního signálu v místě, kam primární elektronový svazek dopadá. Elektronový svazek vyvolává postupně v jednotlivých, vedle sebe hustě uspořádaných bodech, vznik signálu. Intenzita tohoto signálu je posléze měřítkem určitého lokálního stavu. Obraz je výsledkem rozdílu intenzit zpracovávaného signálu v jednotlivých mikroobjemech, kam paprsek elektronů dopadá.

7.2.3. Elektronová mikroskopie pro sledování dvojčatění

Použití elektronové mikroskopie prokázalo, že dvojčata, která se jevila při světelné mikroskopii jako tenké rovnoběžné pásy v zrnech, jsou ve skutečnosti nahromaděné vrstvy mikrodvojčat o tloušťce pouze několik desítek nanometrů. Na obr. 7.2. jsou potom takovéto rovnoběžné vrstvy mikrodvojčat zachycené pomocí TEM mikroskopie. Jedná se o jeden aktivní systém. V případě aktivace dvou systémů je možno pozorovat vzájemnou blokaci těchto systémů.



Obr. 7.2. Mikrostruktura dvojčat při TEM mikroskopii [36]

a) světlé pole **b)** temné pole

Poznatky ze studie deformované struktury TWIP ocelí pomocí světelné a elektronové mikroskopie se dají shrnout do následujících poznatků:

- dva systémy dvojčatění jsou následně po sobě aktivovány ve většině zrn,
- v každém zrně dochází ke skluzu dislokací a mechanickému dvojčatění,
- dvojče a hranice zrn jsou silnou překážkou pro samotná dvojčata,
- mikrodvojčata o tloušťce pouze několika desítek nanometrů se hromadí do vrstev těchto mikrodvojčat o tloušťce několik desítek mikrometrů, která se již dají pozorovat světelnou mikroskopií,
- proces dvojčatění se skládá ze dvou stavů – nejprve se čelo dvojčete pohybuje k nejbližší silné překážce (hranice zrn nebo jiné dvojče) za daného kritického smykového napětí a následně dochází k nárůstu tloušťky dvojčete s nárůstem deformace.

7.3. Rentgenová mikroskopie

Zpracovávat podobným způsobem pomocí optiky (jako v případě světelné mikroskopie nebo elektronové mikroskopie) svazek rentgenových paprsků není technicky možné. Index lomu jakékoli látky pro rentgenové záření je totiž velmi blízký hodnotě 1 a ohnisková vzdálenost by tedy musela být několik km. Rentgenová mikroskopie výsledně využívá jednoduché projekce (rentgenová mikroradiografie), otiskové metody (autoradiografie) a nebo metody řádkovací elektronové mikroskopie (rentgenová topografie a rentgenová distribuční mikroskopie).

Rentgenová mikroradiografie zobrazuje rozdíl v absorpci rentgenového záření, který je dán hlavně výsledkem lokálních změn v chemickém složení. Ve fotografické emulzi pak lze zachytit obraz strukturních útvarů lišící se absorpčním koeficientem.

Při **autoradiografii** je do materiálu předem umístěn radioaktivní izotop. Posléze se získá obraz rozložení tohoto prvku. Místa emitující radioaktivní záření vyvolávají na emulzi citlivého filmu latentní obraz těchto míst.

Rentgenová topografie využívá změny intenzity záření difraktovaného krystalovými rovinami v důsledku poruch krystalové mřížky, které se projeví kontrastem na snímcích.

Rentgenová distribuční mikroskopie zobrazuje rozdíly v chemickém složení povrchových vrstev sledovaného vzorku pomocí řádkovací elektronové mikroskopie.

8. Cíle experimentální části

Hlavním cílem předkládané disertační práce je podat přehled o vlastnostech a chování nového vysokopevnostního materiálu, který vykazuje tzv. **TWIP** (**T**Winning **I**nduced **P**lasticity) **efekt**. S ohledem na obecné možnosti tohoto materiálu, které jsou v současné době poměrně neobjasněné, představuje toto charakterizování velmi širokou oblast, která je nad rámec jedné disertační práce. Nejen z tohoto důvodu, ale také v souvislosti s neuspokojivými znalostmi v oblasti tváření materiálu TWIP a v neposlední řadě i vzhledem ke zkušenostem, znalostem a možnostem Katedry strojírenské technologie, je práce nakonec zaměřena zejména na dvě hlavní oblasti:

- 1) V první řadě se jedná o získání materiálových charakteristik daného materiálu. Vypracování metodiky určování materiálových konstant dle získaných výsledků a popsání chování testovaného materiálu za různých podmínek měření. Na základě naměřených hodnot provést srovnání tohoto materiálu vzhledem k ostatním materiálům používaným v současné době především v automobilovém průmyslu.
- 2) Druhou hlavní charakteristikou a také problematikou, která dokáže objasnit hranice použitelnosti testovaného materiálu, jsou DMP. Je cílem stanovit DMP nejen za normálních podmínek testování, ale s ohledem na vyvinuté zařízení na Katedře strojírenské technologie také určit DMP za vyšších rychlostí tažníku odpovídající crash testům.

V posledních letech dochází ke značnému rozvoji v možnostech sledování a charakterizování procesu deformace materiálů pomocí optických snímacích metod. S ohledem na zaměření této disertační práce je tedy jednou z vhodných metod nejenom jak popsat chování testovaného materiálu, ale také jak verifikovat a upřesnit výsledky obou hlavních cílů a provázat je mezi sebou, využití těchto optických systémů. Tento aspekt však vyžaduje pochopení principu nejenom při samotném snímání měřeného objektu, ale také porozumění zpracování a následnému vyhodnocení zjištěných hodnot. Provázat oba hlavní sledované cíle pomocí optických systémů je dalším cílem této disertační práce.

8.1. Charakteristika materiálu TWIP 1200

Předmětem experimentálního měření byla austenitická ocel spadající pod obecnou skupinu materiálů označovaných jako **TWIP** ocele. Výrobcem tohoto materiálu je **ArcelorMittal** a pro svoje mechanické vlastnosti je v této práci označován jako **TWIP 1200**. Základním znakem této austenitické ocele Fe-Mn-C (nebo Fe-19wt.%Mn-0.6wt.%C) je nízká energie vrstevné chyby (**SFE**) za pokojové teploty. Chemické složení testovaného materiálu je následně uvedeno v tab. 8.1. V současné době však nejsou k dispozici téměř žádná přesná data ohledně velikosti této energie. Remy a Ponesu změřili, že pro Fe-20Mn-4Cr-0.5C je velikost SFE okolo 11 mJ/m^2 (za pokojové teploty). Přítomnost Mn poté především stabilizuje γ -fázi. Je-li v materiálu přítomno více než 20% Mn, dochází však ke zvýšení SFE. Stejná závislost platí i pro C. Naproti tomu přítomnost Cr SFE snižuje. Platí však, že změna **dSFE/dC** je nejméně o dva řády větší než dSFE/dMn a dSFE/dCr. Udržení nízké SFE spočívá tedy především v nízkém obsahu C. Velikost SFE určuje mechanismus deformace austenitické ocele. Nízká hodnota SFE podporuje mechanické dvojčatění, které probíhá spolu se skluzem dislokací.

Jedná se tedy o plně austenitickou a nemagnetickou ocel, kde neprobíhá žádná fázová přeměna. Tato ocel vykazuje jak vysoké hodnoty pevnosti, tak velkou tažnost. Tato skutečnost je dána především díky mimořádně velkému exponentu deformačního zpevnění. Předpokládá se, že vznik dvojčete zvyšuje hodnotu zpevnění materiálu díky svému působení na pohyb dislokací. Dvojče totiž působí jako velmi silná překážka (stejná jako např. hranice zrn) vůči tomuto pohybu. Vznikem dvojčat dochází ke snižování volné dráhy pohybu dislokací (MFP). Toto výrazné zpevnění materiálu následně umožňuje docílit protváření velkého objemu materiálu před vytvořením krčku. Tento zpevňující efekt díky mechanickému dvojčatění bývá v literatuře označován jako plasticita indukovaná dvojčatěním (**TW**inning **I**nduced **P**lasticity – **TWIP**).

Tab. 8.1. Chemické složení materiálu **TWIP 1200**

| Prvek | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | V | W |
|---------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-----|------|
| [max %] | 0,62 | 0,19 | 19,0 | 0,022 | 0,018 | 0,34 | 0,04 | 0,06 | 0,3 | 0,18 |

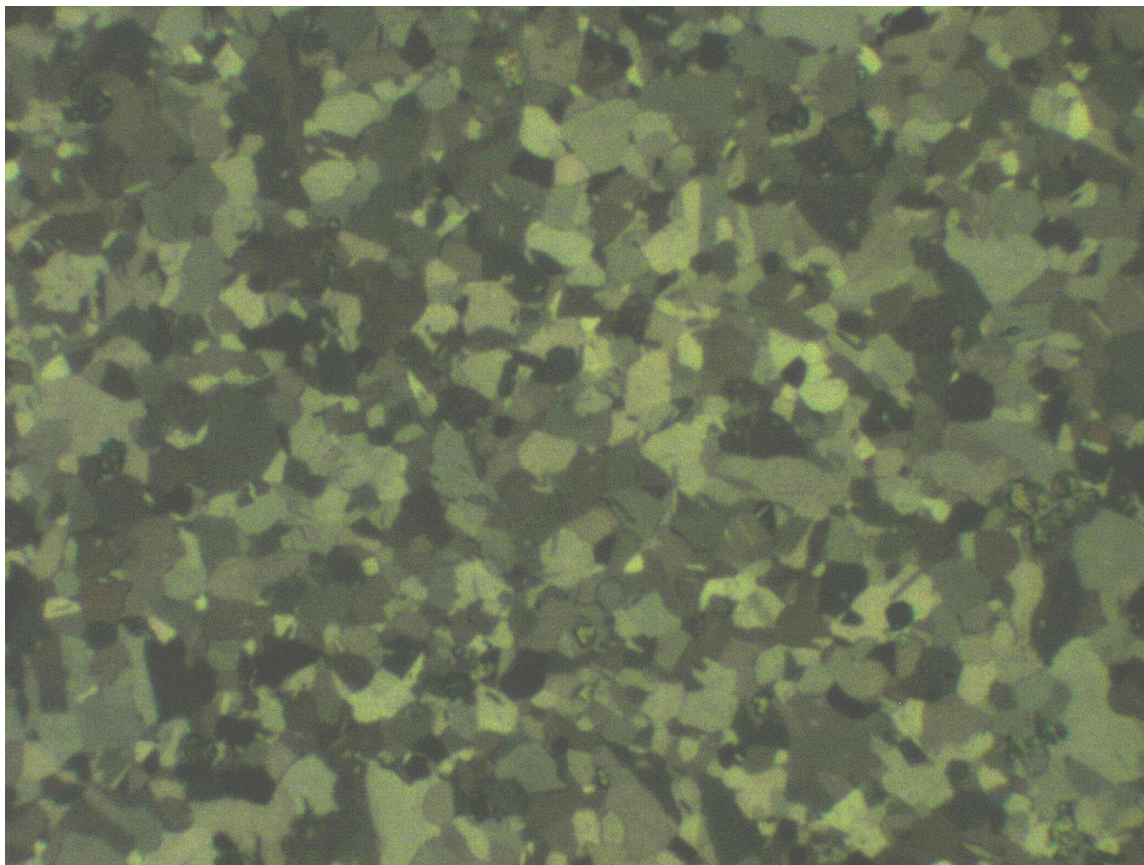
8.2. Struktura materiálu TWIP 1200

Materiál použitý pro experimentální měření se svou strukturou velmi liší od doposud používaných materiálů pro stavbu karoserie. A to nejen od běžných hlubokotažných materiálů, ale také od materiálů vysokopevnostních. U materiálu TWIP 1200 celkový proces souvisí s chemickým složením materiálů, které snižuje energii vrstevné chyby a podporuje tak proces dvojčatění. Je tedy nezbytné věnovat značnou pozornost také metalografickému rozboru tohoto materiálu.

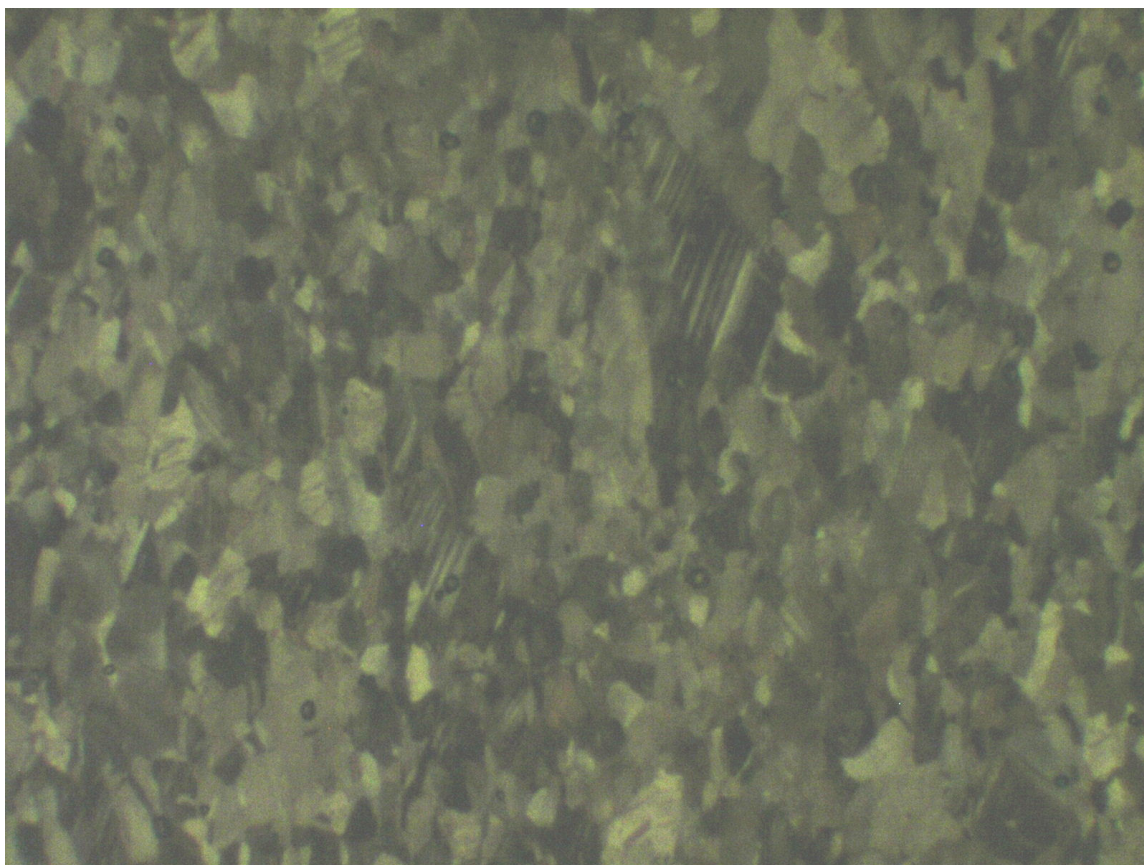
Metalografické hodnocení základní struktury před a po deformaci se provádělo na vzorcích odebraných se směru 0° vůči směru válcování. Vzorky byly odebrány ze středu plechu daného materiálu. Vlastní měření struktury probíhalo v metalografické laboratoři **ČVUT** (Fakulta strojní – Ústav strojírenské technologie). Vzorky byly zality do manipulačních těles pomocí epoxidové pryskyřice (Varidur 200) a následně broušeny na brousícím poloautomatu VPG 200. Byly použity brusné kotouče s drsností od 120 do 650. Následovalo doleštění na mechanické leštičce.

Jako největší úskalí při přípravě metalografických vzorků se jevílo nalezení vhodného leptadla. V České republice téměř neexistuje jakákoliv povědomost o možnosti leptání materiálu o chemickém složení alespoň blízkému zkoumanému materiálu. Bylo tedy nezbytné provést řadu pokusů, kdy byla použita leptadla jako např. Nital nebo Beraha. Nakonec bylo nalezeno leptadlo, které s pomocí polarizovaného světla do jisté míry dokázalo zvýraznit strukturu TWIP materiálu. Pro sledování struktur byl použit světelný optický mikroskop NEOPHOT 21. Snímky struktury před a po deformaci jsou vidět na obr. 8.1. a 8.2.

TWIP materiál je obecně austenitická ocel s vysokým obsahem Mn, který potlačením energie vrstevné chyby podporuje proces mechanického dvojčatění. V zahraničí provedené studie struktury TWIP materiálu pomocí optického mikroskopu popisují strukturu po deformaci jako tzv. „žebříkovitý“ vzor (**ladder-like pattern**). Na obr. 8.2. lze vidět zrna, která vykazují takovýto charakter struktury. Se vzrůstající deformací materiálu vzrůstá také počet zrn, která prodělávají proces mechanického dvojčatění. Snímky struktury zkoumaného materiálu tedy potvrzují předpoklad procesu dvojčatění při deformaci. Je však velmi nezbytné provést hlubší metalografické zkoumání tohoto materiálu a to především pomocí TEM nebo SEM mikroskopie, která pomůže objasnit chování dvojčat v mnohem nižších rozlišeních.



Obr. 8.1. Struktura materiálu TWIP 1200 před deformací, zvětšeno 1000x



Obr. 8.2. Struktura materiálu TWIP 1200 po deformaci, zvětšeno 1000x

9. Statická zkouška tahem

K získání základních mechanických hodnot byla provedena statická zkouška tahem podle ČSN EN 10002-1. Zjišťovány byly následující veličiny - mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m a tažnost A_{50mm} . Původně bylo záměrem zjišťovat a vyhodnocovat také homogenní tažnost A_g , ale nakonec se tato hodnota ve výsledných protokolech neuvádí, jelikož pro materiál TWIP 1200 platí, že $A_g \approx A_{50mm}$ (viz grafické výsledky statické zkoušky tahem – příloha č.1).

Měření probíhalo na zkušebním trhacím zařízení **TIRAtest 2300** (viz obr. 9.1.). Podmínky měření jsou uvedeny v tab. 9.1.

Tab. 9.1. Podmínky měření statické zkoušky tahem

| Podmínky měření | | Měřené hodnoty | | | | | | | | |
|----------------------|----------|----------------|----|----|----|----|----|-----|----|----|
| Rychlost deformace | [mm/min] | 1 | | | 10 | | | 600 | | |
| Směr odebrání vzorků | [°] | 0 | 45 | 90 | 0 | 45 | 90 | 0 | 45 | 90 |



Obr. 9.1. Zkušební zařízení **TIRAtest 2300**

9.1. Vliv rychlosti deformace na mechanické vlastnosti

Pomocí statické zkoušky tahem byl také sledován vliv rychlosti deformace na mechanické vlastnosti zkoumaného materiálu. Byly zvoleny následující rychlosti deformace:

- $v_{c1} = 1 \text{ mm/min}$,
- $v_{c2} = 10 \text{ mm/min}$,
- $v_{c3} = 600 \text{ mm/min}$.

Vzorky byly nejprve nařezány vodním paprskem ve třech hlavních směrech oproti směru válcování (0° , 45° a 90°). Tato technologie byla zvolena na základě nemožnosti použití technologie stříhání a také snahou tepelně neovlivnit zkoumaný materiál (což vylučovalo např. technologii řezání plazmou). Na obr. 9.2. jsou vidět vzorky po řezání vodním paprskem pro vybrané směry vzorků. Hrany vzorků byly následně jemně zbroušeny k zamezení vlivu povrchových vad na výsledné mechanické vlastnosti (viz kap. 10.).



Obr. 9.2. Vzorky po řezání vodním paprskem a vybrané směry vzorků (0° , 45° a 90°)

Pro každou sérii testování bylo připraveno cca 10 vzorků, pro vlastní měření a následné statistické vyhodnocení bylo použito 5 vzorků. Ze statické zkoušky byly zjišťovány základní materiálové charakteristiky – jednalo se o smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m a tažnost A_{50mm} . Pomocí softwaru OriginPro 7.5 byly hledány velikosti modulu monotónního zpevnění C a exponentu deformačního zpevnění n a to pro dva základní intervaly této aproximace. Konkrétně se jednalo o $\varphi \in <10;20>\%$ a $\varphi \in <5\%;R_m>$. Podrobnější popsání zjišťování těchto ukazatelů je podáno v kap. 9.3. Na následujících stránkách jsou pomocí tabulek a grafů zobrazeny závislosti mechanických hodnot materiálu TWIP 1200 na deformační rychlosti. V grafech je vždy pomocí bledě modré barvy zobrazena velikost chyby měření. Vlastní aritmetický průměr pak tedy leží uprostřed této bledě modré části sloupce grafu (viz obr. 9.3.).

Dle normy ČSN ISO 10 275 se zjišťovala velikost koeficientu normálové anizotropie r_α , plošné anizotropie Δr a střední hodnoty anizotropie $r_{stř}$. Vzorky byly orýsovány, následně nataženy na $\varepsilon = 20\%$ (10 mm) a pomocí Abbého délkoměru změřeny délkové rozměry vzorku. Šířka byla změřena na třech vybraných místech pomocí mikrometru Mitutoyo. Pro každou zkoušku bylo měřeno pět vzorků. Zjištěné velikosti anizotropie jsou uvedeny v tab. 9.2.

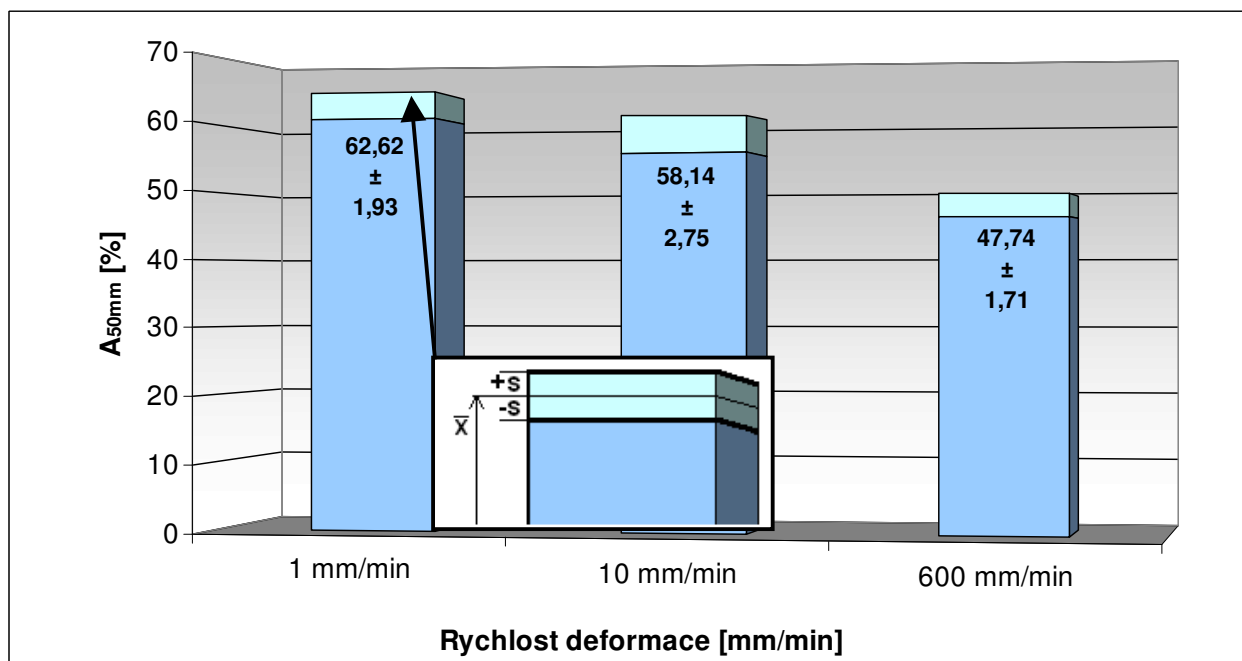
Tab. 9.2. Hodnoty anizotropie materiálu TWIP 1200

| Hodnoty koeficientu anizotropie [-] | | | |
|-------------------------------------|--------|----------|----------|
| Normálová anizotropie r_α | r_0 | r_{45} | r_{90} |
| | 1,077 | 1,059 | 1,102 |
| Plošná anizotropie Δr | 0,0305 | | |
| Střední anizotropie $r_{stř}$ | 1,074 | | |

Z naměřených hodnot velikosti anizotropie materiálu je patrné, že se jedná téměř o zcela izotropní materiál. Tato skutečnost je v souladu s hodnotami anizotropie ostatních vysokopevnostních materiálů (např. Docol 1200M), které mají také velikost anizotropie $r_\alpha \approx 1$. Nepřímo jsou pak výsledky anizotropie zkoumaného materiálu potvrzeny pomocí měření velikosti mechanických hodnot ze statické zkoušky tahem, které nejsou do velké míry ovlivněny směrem odebrání vzorků.

Tab. 9.3. Hodnoty tažnosti A_{50mm} pro směr odebrání vzorků 0°

| Směr odebrání vzorků: 0° | | A_{50mm} [%] | | |
|-------------------------------------|-----------|----------------|--------------|--------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \bar{x} | 62,62 | 58,14 | 47,69 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 1,93 | 2,75 | 1,71 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 60,04 | 55,02 | 45,39 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 64,51 | 61,34 | 49,42 |

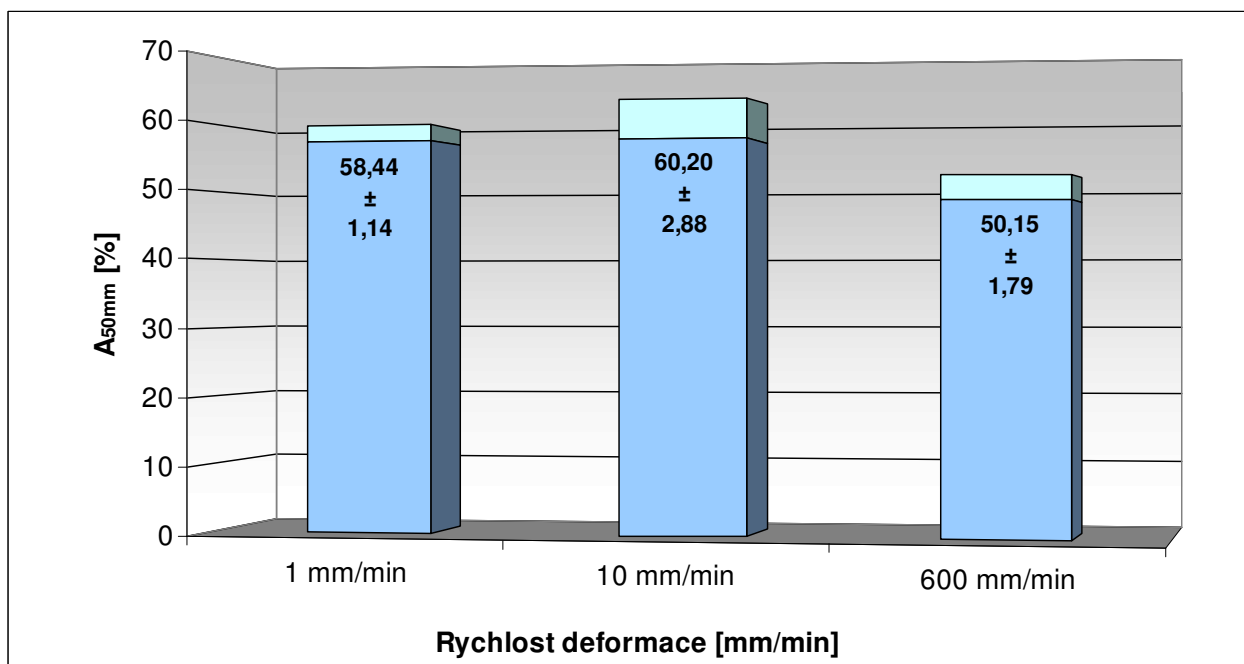


Obr. 9.3. Graf hodnot tažnosti A_{50mm} pro směr odebrání vzorků 0°

Na obr. 9.3. je znázorněn nejenom charakter vlivu rychlosti deformace na velikost tažnosti A_{50mm} , ale také význam různých odstínů modré ve sloupcích grafů. Je patrné, že se vzrůstající rychlostí deformace dochází k poklesu tažnosti měřeného materiálu. Budeme-li brát rychlost deformace $v_{c2} = 10$ mm/min jako 100% sledovaných hodnot, představuje posléze snížení deformační rychlosti na hodnotu $v_{c1} = 1$ mm/min nárůst tažnosti o **7,83%**. V případě maximální možné rychlosti deformace ($v_{c3} = 600$ mm/min) naopak dochází k poklesu tažnosti o **17,89%**.

Tab. 9.4. Hodnoty tažnosti A_{50mm} pro směr odebrání vzorků 45°

| Směr odebrání vzorků: 45° | | A_{50mm} [%] | | |
|----------------------------------|-----------|----------------|-----------|------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \bar{x} | 58,44 | 60,20 | 50,15 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 1,14 | 2,88 | 1,79 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 57,39 | 56,68 | 47,88 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 60,10 | 62,81 | 52,28 |

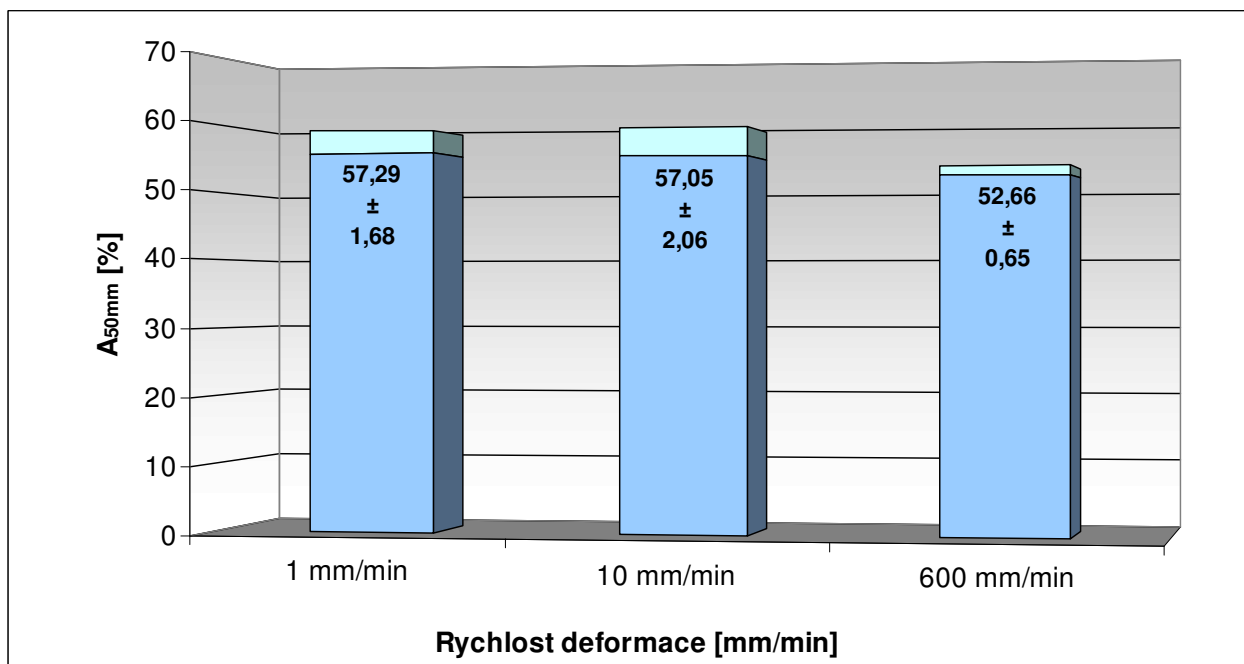


Obr. 9.4. Graf hodnot tažnosti A_{50mm} pro směr odebrání vzorků 45°

V případě odebrání vzorku ve směru 45° na směr válcování představuje velikost tažnosti pro rychlost deformace $v_{c2} = 10$ mm/min maximum ze všech tří sledovaných deformačních rychlostí. Pokles tažnosti při rychlosti deformace $v_{c1} = 1$ mm/min představuje **2,96%**. Domnívám se, že tato menší odchylka od trendů sledovaných při ostatních směrech odebrání je dána spíše statistickou chybou. Pro maximální deformační rychlost pak činí pokles tažnosti **16,69%**. Hodnoty tažnosti pro tento směr odebrání jsou (vyjma rychlosti deformace $v_{c1} = 1$ mm/min) cca o **5%** nižší.

Tab. 9.5. Hodnoty tažnosti A_{50mm} pro směr odebrání vzorků 90°

| Směr odebrání vzorků: 90° | | A_{50mm} [%] | | |
|----------------------------------|-----------|----------------|-----------|------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \bar{x} | 57,29 | 57,05 | 52,66 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 1,68 | 2,06 | 0,65 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 55,04 | 54,72 | 52,04 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 59,33 | 59,48 | 53,65 |



Obr. 9.5. Graf hodnot tažnosti A_{50mm} pro směr odebrání vzorků 90°

Pro směr odebrání vzorků ve směru 90° jsou hodnoty pro první dvě sledované rychlosti deformace téměř zcela shodné. Liší se pouze o **0,42%**, což je v rámci naměřené chyby. Tažnost A_{50mm} pro rychlost $v_{c3} = 600$ mm/min je nakonec o **7,24%** nižší než pro předchozí rychlosti deformace. Při porovnání s ohledem na směr odebrání vzorků jsou rozdíly pro všechny tři sledované rychlosti deformace zanedbatelné (pohybují se v rozmezí cca **4%**) a nepřímě tak potvrzují předpoklad, že materiál TWIP 1200 je izotropní.

Tab. 9.6. Hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ pro směr odebrání vzorků 0°

| Směr odebrání vzorků: 0° | | $R_{p0,2}$ [MPa] | | |
|-------------------------------------|------------|------------------|---------------|---------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 562,44 | 558,79 | 525,50 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 2,40 | 4,94 | 4,27 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{\min} | 559,04 | 554,47 | 519,19 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{\max} | 565,56 | 567,21 | 530,79 |

Tab. 9.7. Hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ pro směr odebrání vzorků 45°

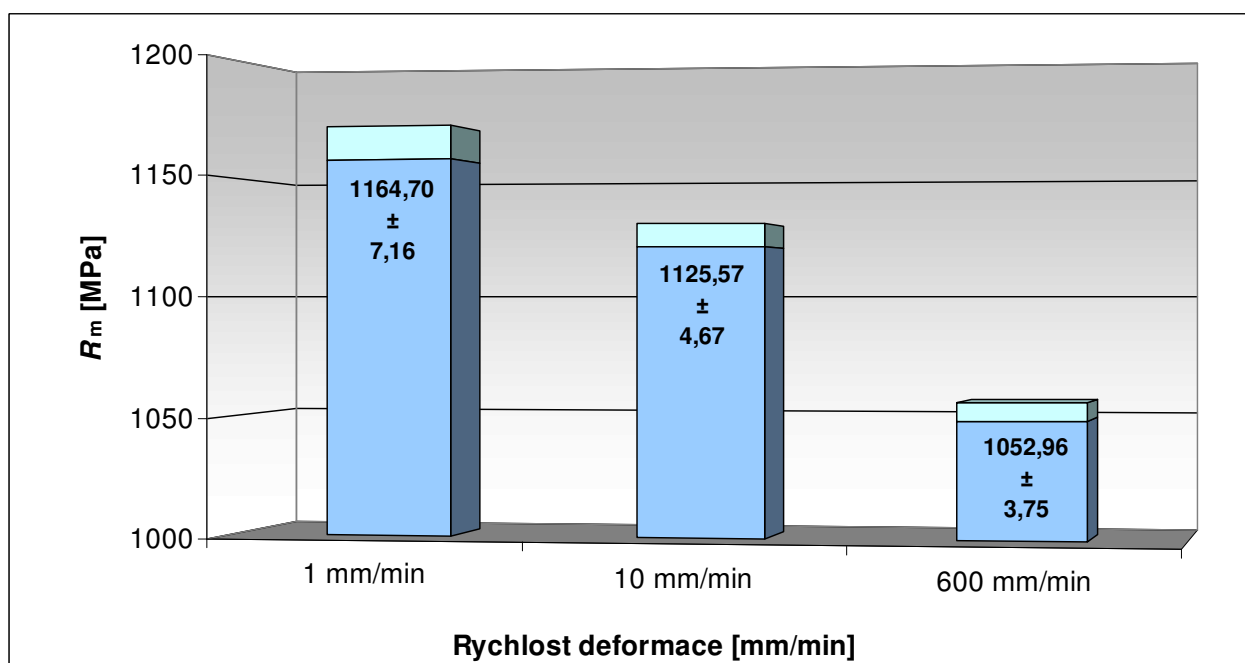
| Směr odebrání vzorků: 45° | | $R_{p0,2}$ [MPa] | | |
|-------------------------------------|------------|------------------|---------------|---------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 585,54 | 585,49 | 560,94 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 2,30 | 8,98 | 2,90 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{\min} | 582,29 | 573,12 | 558,85 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{\max} | 587,94 | 598,47 | 565,99 |

Tab. 9.8. Hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ pro směr odebrání vzorků 90°

| Směr odebrání vzorků: 90° | | $R_{p0,2}$ [MPa] | | |
|-------------------------------------|------------|------------------|---------------|---------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 601,65 | 597,96 | 610,85 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 5,01 | 4,61 | 2,78 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{\min} | 597,85 | 592,60 | 607,20 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{\max} | 610,34 | 605,09 | 614,18 |

Tab. 9.9. Hodnoty meze pevnosti R_m pro směr odebrání vzorků 0°

| Směr odebrání vzorků: 0° | | R_m [MPa] | | |
|-------------------------------------|------------|----------------|----------------|----------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 1164,70 | 1125,57 | 1052,96 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 7,16 | 4,67 | 3,75 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{\min} | 1156,07 | 1118,65 | 1046,66 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{\max} | 1171,35 | 1131,77 | 1055,98 |

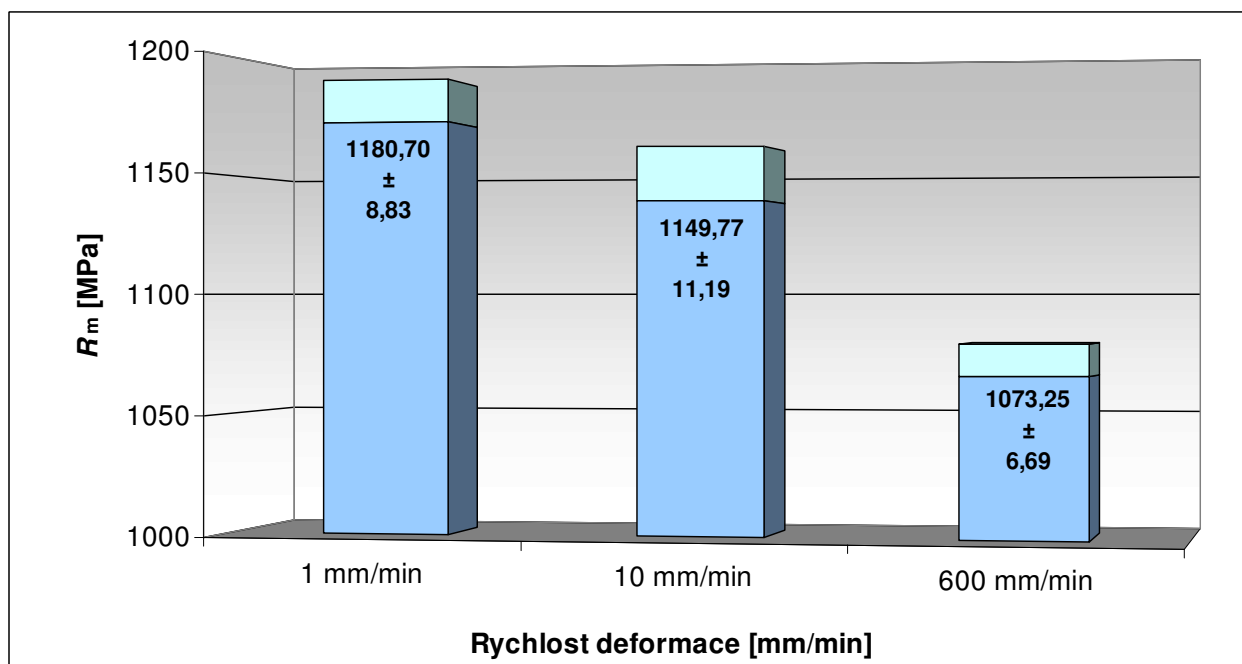


Obr. 9.6. Graf hodnot meze pevnosti R_m pro směr odebrání vzorků 0°

V tomto případě je velmi dobře patrný trend, kdy při narůstající rychlosti deformace dochází k poklesu hodnot meze pevnosti R_m . Budeme-li opět brát v úvahu normou předepsanou rychlost deformace $v_{c2} = 10$ mm/min jako 100%, představuje nárůst při nejnižší měřené rychlosti deformace **3,48%** a naopak pokles pro maximální použitou rychlost deformace je zhruba o **75 MPa (6,45%)**. Při této rychlosti deformace je však třeba vzít v úvahu jistou nepřesnost měření (i přes maximální použitelnou frekvenci snímání dat: 200 Hz).

Tab. 9.10. Hodnoty meze pevnosti R_m pro směr odebrání vzorků 45°

| Směr odebrání vzorků: 45° | | R_m [MPa] | | |
|-------------------------------------|------------|----------------|----------------|----------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 1180,70 | 1149,77 | 1073,25 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 8,83 | 11,19 | 6,69 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{\min} | 1166,31 | 1135,95 | 1065,99 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{\max} | 1189,74 | 1165,22 | 1083,55 |

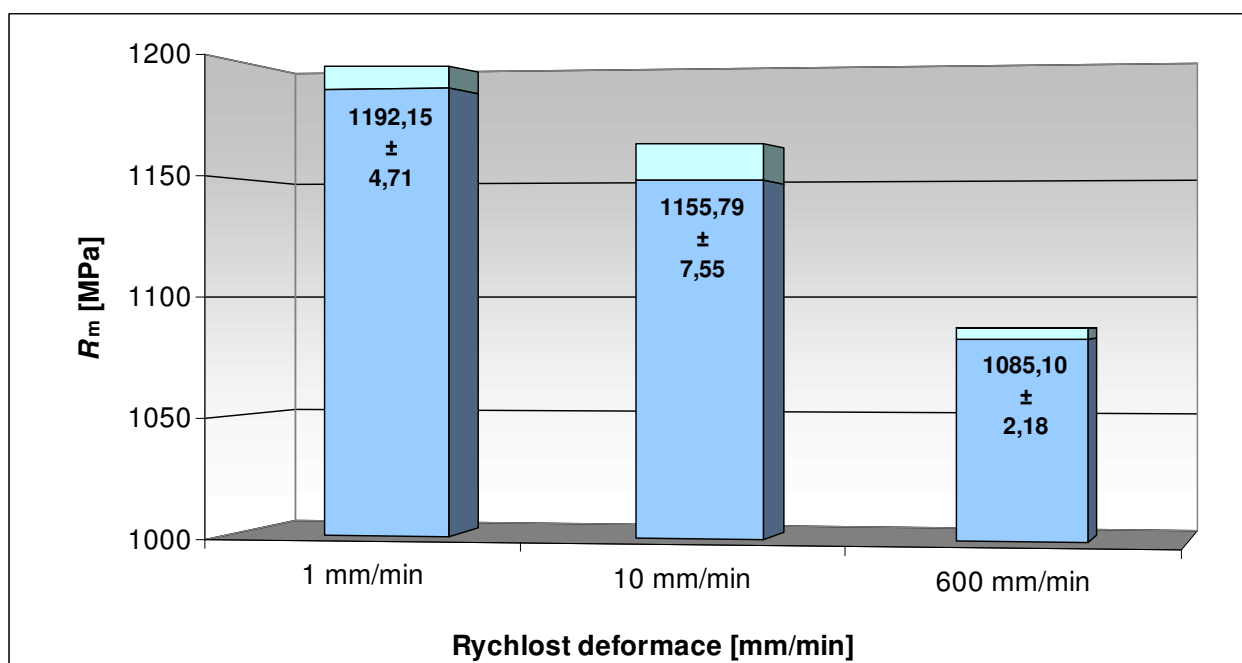


Obr. 9.7. Graf hodnot meze pevnosti R_m pro směr odebrání vzorků 45°

Pro směr odebrání vzorků pod úhlem 45° vůči směru válcování byly naměřeny pro všechny tři sledované rychlosti deformace vyšší hodnoty (zhruba o 20 MPa) meze pevnosti R_m než pro směr odebrání vzorků 0° . I přes tuto skutečnost také tyto naměřené hodnoty vypovídají spíše o izotropii testovaného materiálu TWIP 1200. Nárůst meze pevnosti při minimální rychlosti deformace $v_{c1} = 1$ mm/min představuje **2,69%**. Pokles pro maximální použitou rychlost deformace $v_{c3} = 600$ mm/min je opět cca **75 MPa (6,66%)**, což je obdobné jako v předešlém případě (0°).

Tab. 9.11. Hodnoty meze pevnosti R_m pro směr odebrání vzorků 90°

| Směr odebrání vzorků: 90° | | R_m [MPa] | | |
|----------------------------------|------------|-------------|-----------|------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \bar{x} | 1192,15 | 1155,79 | 1085,08 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 4,71 | 7,57 | 2,18 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{\min} | 1187,16 | 1149,62 | 1083,02 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{\max} | 1198,44 | 1168,30 | 1088,75 |



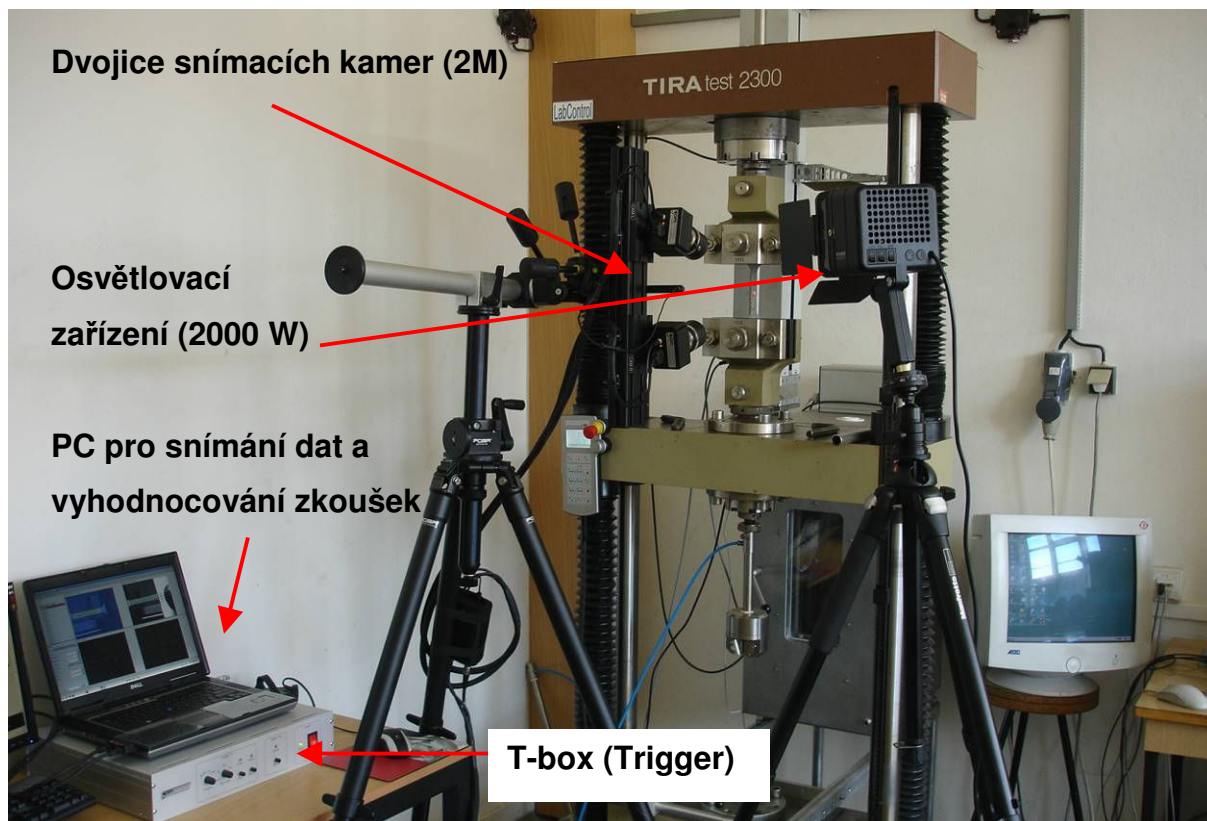
Obr. 9.8. Graf hodnot meze pevnosti R_m pro směr odebrání vzorků 90°

Hodnoty meze pevnosti R_m pro směr odebrání vzorků 90° představují maximální naměřené velikosti této materiálové charakteristiky pro všechny tři rychlosti deformace ze všech tří směrů odebrání a to cca o 15 MPa. V tomto případě činí rozdíl mezi rychlostmi deformace $v_{c2} = 10$ mm/min a $v_{c1} = 1$ mm/min **3,15%**, což je velmi obdobný rozdíl jako v předešlých směrech odebrání. Pro maximální rychlost deformace $v_{c3} = 600$ mm/min byl naměřen pokles o **6,12%**. Tato velikost je znovu téměř shodná s poklesem hodnot meze pevnosti R_m pro zbylé směry odebrání.

9.2. Sledování deformace pomocí optického systému

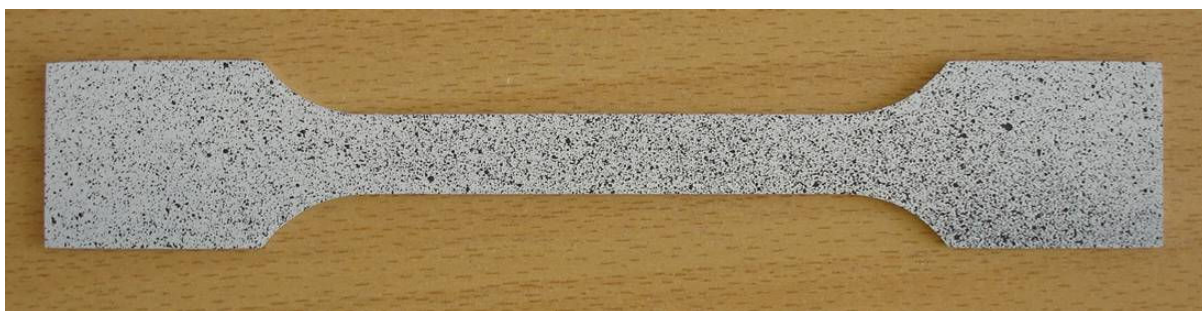
V září 2008 byl na Katedru strojírenské technologie zakoupen jeden z optických měřicích systémů firmy **GOM**. Konkrétně se jedná o systém **ARAMIS – v6.1.1-2**, což je zařízení umožňující bezkontaktní měření deformace [40]. Jelikož se jedná o zcela odlišný přístup k popsání chování materiálu během deformace než je běžné při statické zkoušce tahem a také vzhledem k zaměření této práce, jevílo se jako velmi výhodné (i přes malou zkušenost při práci s tímto systémem) provést měření materiálu TWIP 1200 také pomocí tohoto systému.

Systém ARAMIS využívá k měření deformace materiálu snímání daného vzorku pomocí dvou kamer. Před samotným měřením musí dojít ke kalibraci těchto kamer, což posléze umožní relevantní měření deformace v určitém kalibračním objemu. Velikost tohoto prostoru záleží na použité kalibrační destičce, která obsahuje kalibrační body o předem daných souřadnicích, které kalibrované kamery zachytí z různých úhlů snímání. Při vlastním měření je tedy nezbytné pohybovat se vždy v tomto kalibračním objemu. Na obr. 9.9. je snímek uspořádání pracoviště pro sledování deformace pro statickou zkoušku tahem.



Obr. 9.9. Uspořádání pracoviště při snímání deformace pomocí systému **ARAMIS**

Na obr. 9.9. vidíme dvojici kamer ke snímání měřeného vzorku, osvětlovací zařízení o výkonu 2000 W, T-box (Trigger) pro řízení frekvence snímání a PC pro vyhodnocování zkoušek. Na vlastní měřený vzorek je potřeba nanést stochastický vzorek (pattern). Systém ARAMIS pomocí tohoto vzoru přiřadí každému bodu charakteristické číslo (odstín šedi) a nanese vlastní síť. Měření deformace probíhá snímáním posunu těchto bodů a deformace sítě. Testovaný materiál TWIP 1200 s naneseným vzorem je na obr. 9.10.



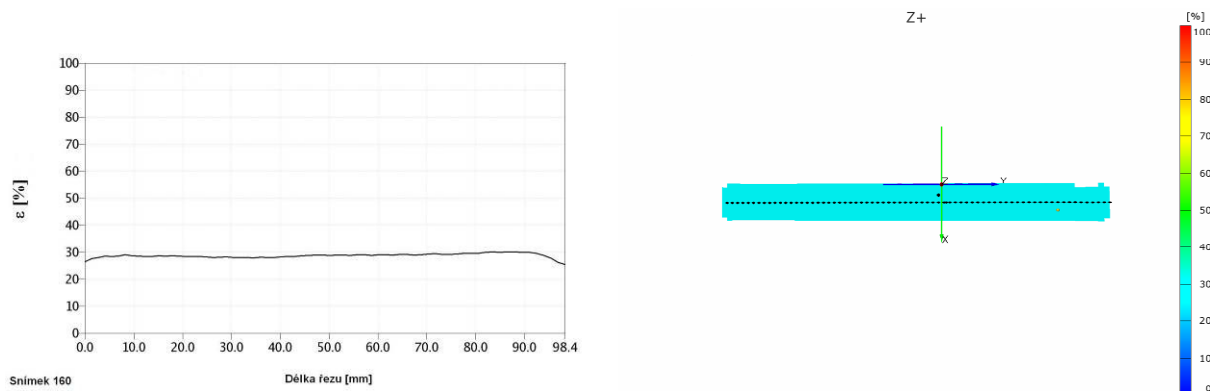
Obr. 9.10. Měřený materiál s naneseným stochastickým vzorem

Takto připravený vzorek byl vložen do čelistí trhačího zařízení a byl pořízen jeden snímek. Na obr. 9.11. (vlevo) je vidět fotografie z levé kamery, kde již byla vybrána tzv. maska sítě (zelená oblast), tedy vlastní měřená oblast. Na obr. 9.11. (vpravo) je síť nanesená systémem ARAMIS bez jakékoli interpolace. Oba snímky odpovídají počátečnímu stavu měření.



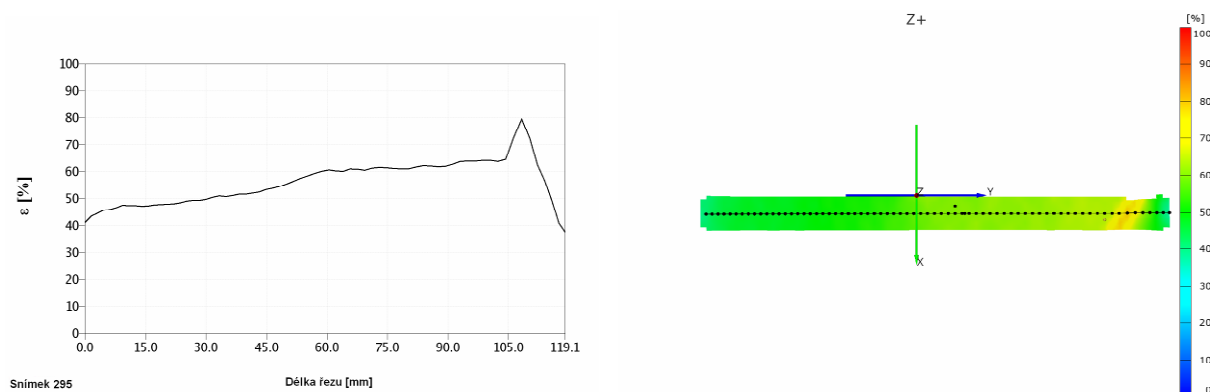
Obr. 9.11. Snímek z levé kamery (vlevo) a pokrytí vzorku deformační sítí (vpravo)

Pomocí následujících snímků lze poměrně výhodně charakterizovat chování materiálu TWIP 1200 při tahovém namáhání. Obrázky vždy obsahují rozložení deformace podél osy vzorku (vlevo) a na celé měřené ploše vzorku. První dvojice snímků je pro stav, kdy $\varepsilon \approx 30\%$.



Obr. 9.12. Snímky při relativním prodloužení $\varepsilon \approx 30\%$

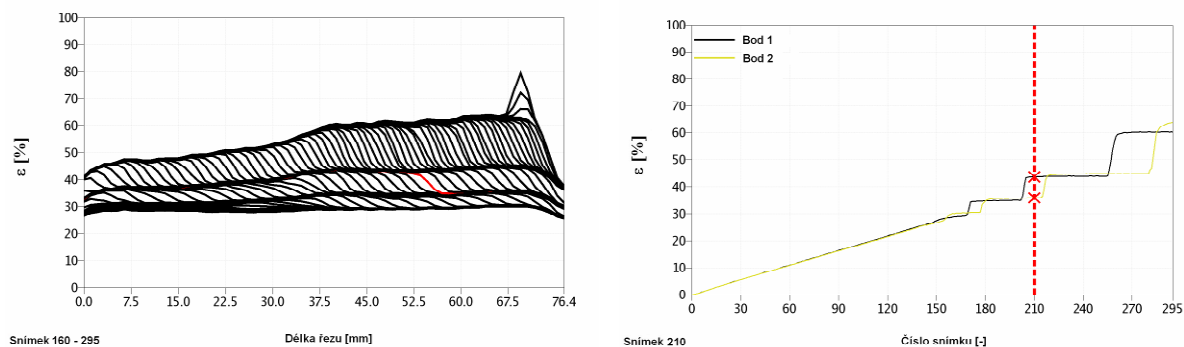
Ukazuje se, že i když je poměrné prodloužení již cca $\varepsilon \approx 30\%$, rozložení deformace po celé ploše měřeného vzorku je homogenní. Další dvojice snímků zobrazuje stav těsně před porušením zkoušeného materiálu.



Obr. 9.13. Snímky těsně před lomem materiálu ($\varepsilon \approx 60\%$)

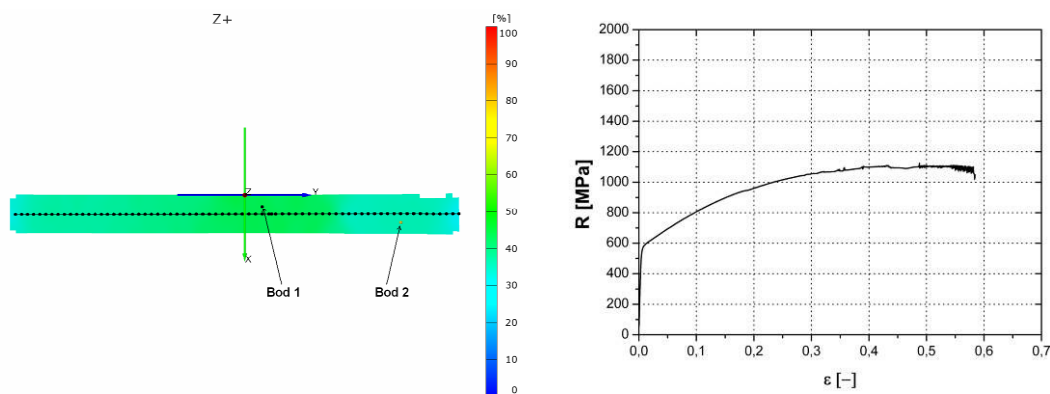
V okamžiku porušení materiálu je v daném místě určitá lokalizace napětí o špičce poměrného prodloužení $\varepsilon > 75\%$. K této lokalizaci deformace však dochází až v samotném závěru měření a ve zbývající části vzorku je spíše stále homogenní deformace ($\varepsilon = 50 - 60\%$). K zajímavému poznání dochází při bližším zaměření na průběh deformace vzorku mezi těmito hranicemi (**$\varepsilon = 30\%$ až lom materiálu**).

Při bližším pohledu na tento interval můžeme na obr. 9.14. vlevo vidět průběh rozložení poměrného prodloužení podél osy vzorku pro všechny zachycené stavy v tomto intervalu (snímek 210 je zobrazen červenou barvou). Pro lepší přehlednost je na stejném obrázku vpravo znázorněno ϵ dvou vybraných bodů - snímek 210.



Obr. 9.14. Rozložení ϵ při $\epsilon \in <30\%; R_m>$ a jeho průběh pro dva body

K pochopení výše zaznamenaného chování je vhodné zde také vykreslit záznam z klasické zkoušky tahem, který je typický pro materiál TWIP 1200. Tento záznam je spolu s grafickým rozložením poměrného prodloužení pro snímek 210 na obr. 9.15.



Obr. 9.15. Rozložení ϵ pro snímek 210 a záznam ze zkoušky tahem

V intervalu $\epsilon \in <30; 60>\%$ jakoby materiálem při zvětšující se deformaci probíhají postupně určité „vlny“, které vždy navýší hodnotu přetvoření o stále větší a větší hodnotu. V záznamu tahové zkoušky toto chování cca od $\epsilon \approx 30\%$ způsobuje neustále se zvětšující „rozkmitávání“ přiloženého průtahoměru. Tato skutečnost potvrzuje předpoklad postupných vytváření dvojčat, které umožní protváření celého objemu materiálu a dosažení tak velké tažnosti při velkých pevnostních hodnotách.

9.3. Určení regresních koeficientů C a n

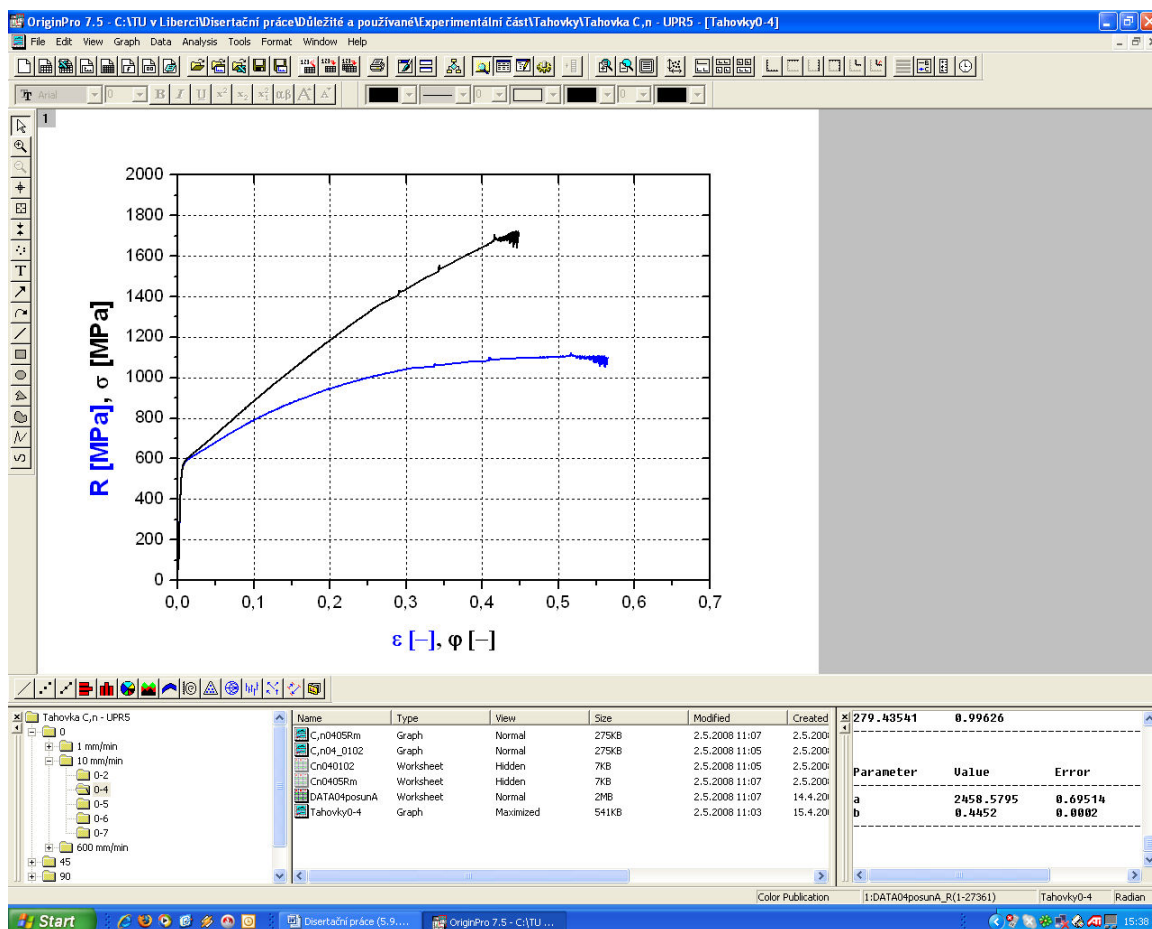
Dalším krokem k popsání zkoumaného materiálu TWIP 1200 bylo nalezení koeficientů aproximační křivky dle Swift-Krupkovského:

$$\sigma = C\varphi^n \text{ [MPa]} \quad (80)$$

kde: C - modul monotónního zpevnění [MPa]

n - exponent deformačního zpevnění [-]

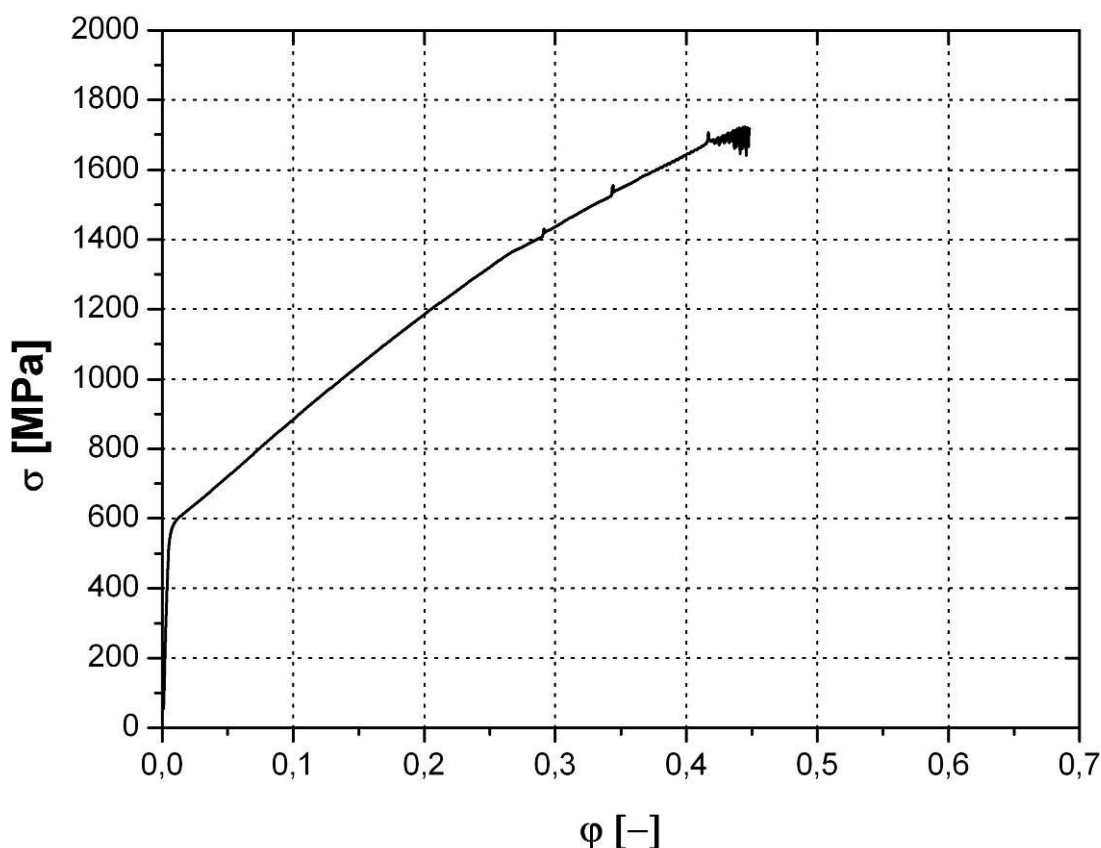
Jelikož nebylo možné použití software LabTest v.3, který je normálně používán k vyhodnocování výsledků statické zkoušky tahem, bylo nutné zvolit nový postup. Data ze všech naměřených kanálů tahových zkoušek byla exportována jako soubory CSV (*.csv) do softwaru OriginPro 7.5. Zde bylo nejprve nutné provést přepočet těchto naměřených hodnot k získání **smluvního (R - ϵ)** a **skutečného (σ - φ)** diagramu tahové zkoušky. Ukázka pracovního prostředí softwaru OriginPro 7.5 a jeden z takto získaných diagramů tahové zkoušky je vidět na obr. 9.16.



Obr. 9.16. Pracovní prostředí programu OriginPro 7.5

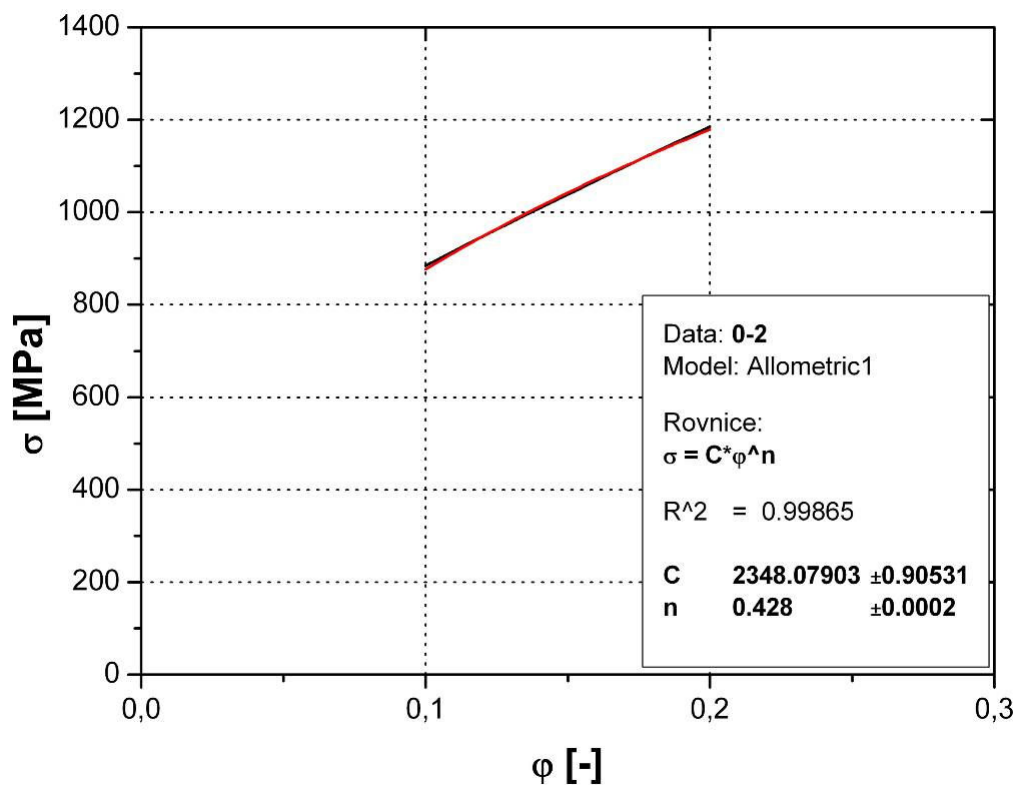
S ohledem na vybrané intervaly zjišťování hledaných koeficientů byl následně vybrán skutečný diagram tahové zkoušky (viz obr. 9.17.). Dané intervaly byly vybrány pomocí norem a jednalo se o následující dva intervaly:

- 1) $\varphi \in <10;20>\%$,
- 2) $\varphi \in <5\%;R_m>$.

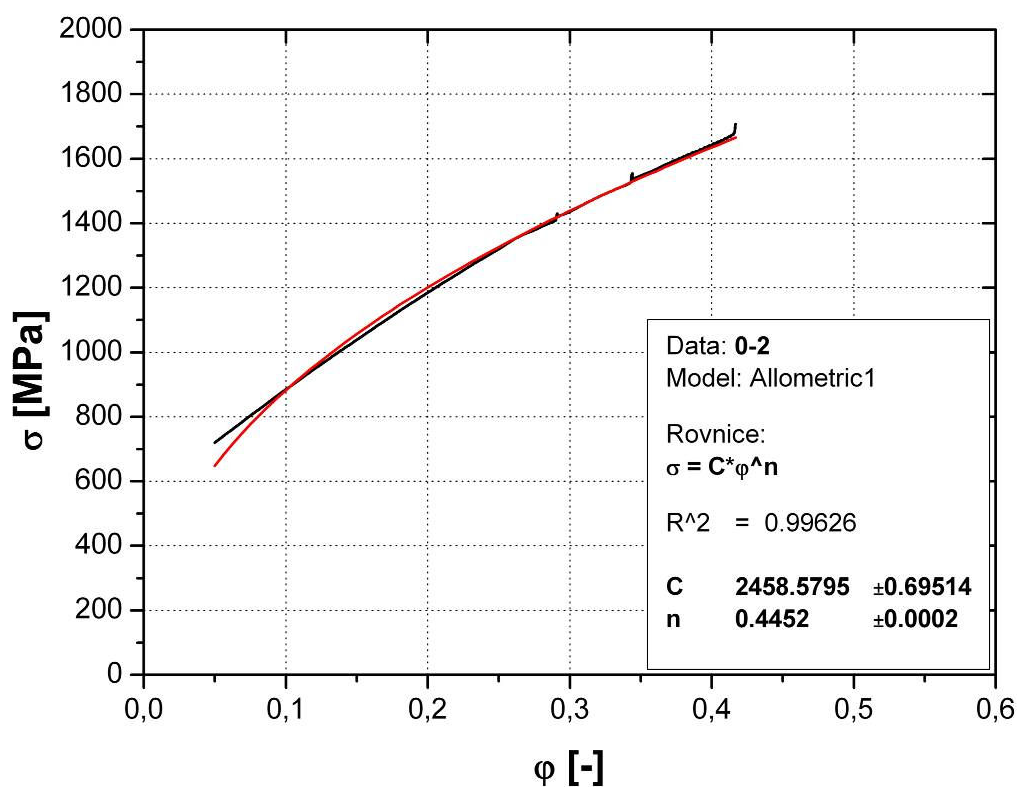


Obr. 9.17. Skutečný diagram tahové zkoušky

Pro takto získaný graf bylo posléze nutné vymezit hranice pro proložení dané exponenciální křivky. V našem případě se tedy jednalo o dva vybrané intervaly. Křivka skutečných hodnot tahové zkoušky byla vykreslena pouze v těchto vybraných intervalech $\varphi \in <10;20>\%$ a $\varphi \in <5\%;R_m>$. Poté už následovalo jenom pomocí metody nejmenších čtverců nalezení nejvhodnější aproximací křivky pro naměřený vzorek. Na následující stránce je vždy původní naměřená křivka označena černou barvou a získaná aproximační křivka má barvu červenou. Je tedy dobře vidět, do jaké míry odpovídá aproximace skutečnosti. O míře přiblížení skutečnosti vypovídá také koeficient spolehlivosti **R**. Nalezené hodnoty modulu monotónního zpevnění **C** a exponentu deformačního zpevnění **n** jsou vždy v pravém rohu grafů.



Obr. 9.18. Aproximace křivky zpevnění pro interval $\phi \in \langle 10; 20 \rangle \%$



Obr. 9.19. Aproximace křivky zpevnění pro interval $\phi \in \langle 5\%; R_m \rangle$

Tab. 9.12. Hodnoty modulu monotónního zpevnění **C** pro směr odebrání vzorků **0°** a aproximaci v intervalu $\varphi \in <10;20>^\circ$

| Směr odebrání vzorků: 0° | | C [MPa] | | |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 2458,892 | 2366,386 | 2238,652 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 37,154 | 25,555 | 7,804 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 2401,660 | 2331,272 | 2229,311 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 2498,779 | 2388,208 | 2247,776 |

Tab. 9.13. Hodnoty modulu monotónního zpevnění **C** pro směr odebrání vzorků **45°** a aproximaci v intervalu $\varphi \in <10;20>^\circ$

| Směr odebrání vzorků: 45° | | C [MPa] | | |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 2459,637 | 2380,037 | 2236,039 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 17,883 | 24,561 | 7,754 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 2438,346 | 2355,832 | 2226,883 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 2473,458 | 2414,773 | 2248,399 |

Tab. 9.14. Hodnoty modulu monotónního zpevnění **C** pro směr odebrání vzorků **90°** a aproximaci v intervalu $\varphi \in <10;20>^\circ$

| Směr odebrání vzorků: 90° | | C [MPa] | | |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 2442,912 | 2354,146 | 2217,924 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 12,854 | 47,340 | 2,290 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 2427,743 | 2299,425 | 2214,102 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 2460,363 | 2426,636 | 2221,915 |

Tab. 9.15. Hodnoty modulu monotónního zpevnění **C** pro směr odebrání vzorků **0°** a interpolaci v intervalu $\varphi \in <5\%; R_m>$

| Směr odebrání vzorků: 0° | | C [MPa] | | |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 2574,388 | 2460,120 | 2293,919 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 19,842 | 7,807 | 6,978 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 2543,380 | 2452,566 | 2285,340 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 2593,941 | 2468,708 | 2303,212 |

Tab. 9.16. Hodnoty modulu monotónního zpevnění **C** pro směr odebrání vzorků **45°** a interpolaci v intervalu $\varphi \in <5\%; R_m>$

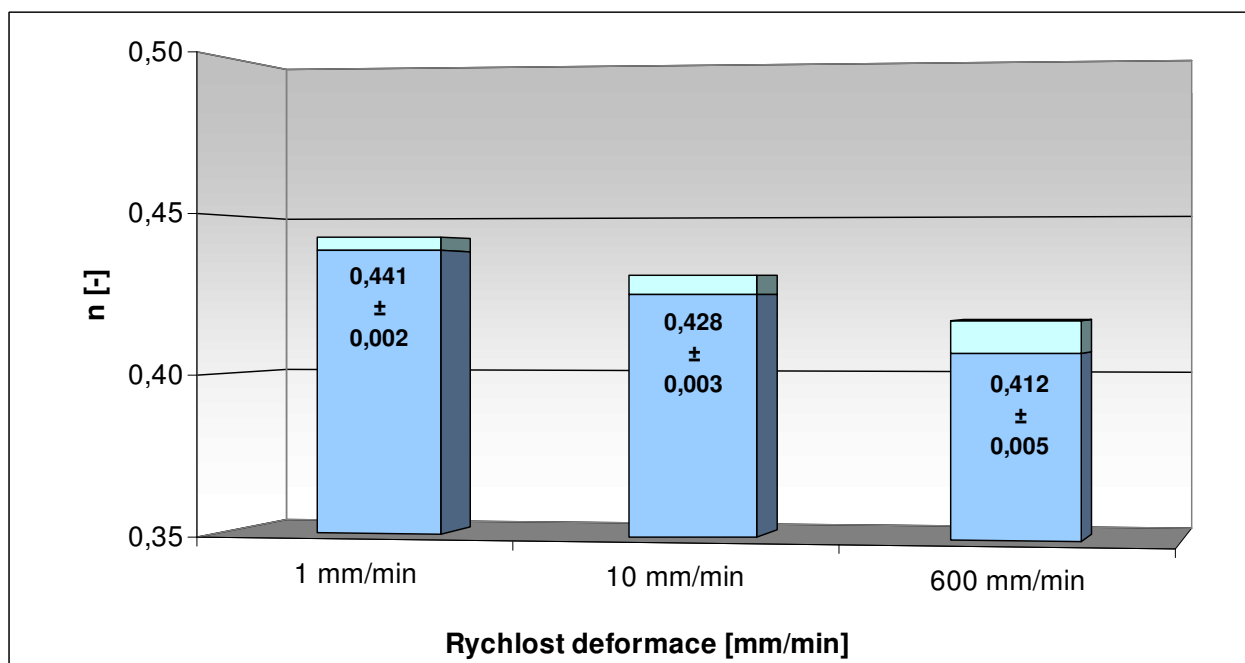
| Směr odebrání vzorků: 45° | | C [MPa] | | |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 2583,444 | 2501,407 | 2317,336 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 30,088 | 15,480 | 13,112 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 2544,744 | 2480,919 | 2304,327 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 2628,105 | 2516,959 | 2339,365 |

Tab. 9.17. Hodnoty modulu monotónního zpevnění **C** pro směr odebrání vzorků **90°** a interpolaci v intervalu $\varphi \in <5\%; R_m>$

| Směr odebrání vzorků: 90° | | C [MPa] | | |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 2602,539 | 2492,015 | 2337,377 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 20,751 | 37,933 | 7,111 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 2577,781 | 2430,824 | 2330,084 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 2628,923 | 2533,085 | 2345,324 |

Tab. 9.18. Hodnoty exponentu deformačního zpevnění n pro směr odebrání vzorků 0° a aproximaci v intervalu $\varphi \in \langle 10; 20 \rangle^\circ$

| Směr odebrání vzorků: 0° | | $n [-]$ | | |
|---------------------------------|------------|----------|-----------|------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \bar{x} | 0,441 | 0,428 | 0,412 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 0,002 | 0,003 | 0,005 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{\min} | 0,438 | 0,425 | 0,407 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{\max} | 0,444 | 0,432 | 0,420 |

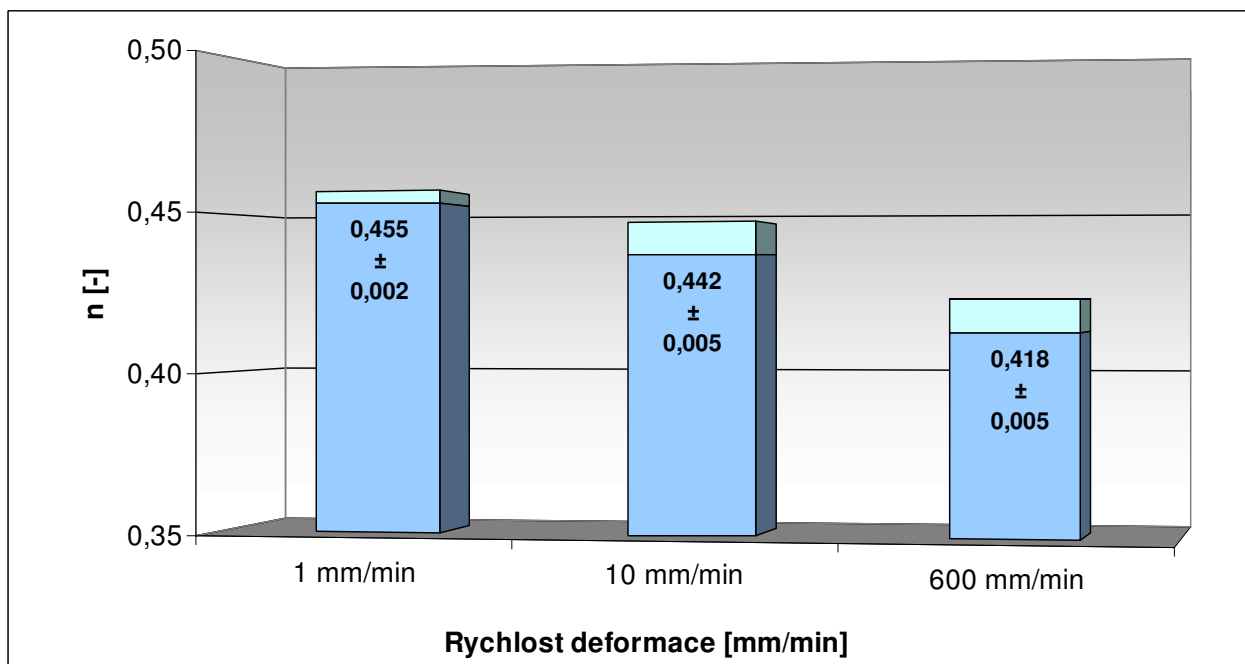


Obr. 9.20. Graf hodnot exponentu deformačního zpevnění n pro směr odebrání vzorků 0° a aproximaci v intervalu $\varphi \in \langle 10; 20 \rangle^\circ$

Z důvodu většího uplatnění exponentu deformačního zpevnění n jsou tabulky hodnot doplněny (alespoň pro směr odebrání vzorků 0°) také o grafické znázornění. Z obr. 9.20. je patrný trend pozorovaný i pro modul monotónního zpevnění C pro všechny směry odebrání vzorků a oba aproximační intervaly. Tento je představován klesající hodnotou exponentu deformačního zpevnění n se zvyšující se rychlostí deformace. I pro maximální rychlost deformace je však jeho velikost stále značná.

Tab. 9.19. Hodnoty exponentu deformačního zpevnění n pro směr odebrání vzorků 0° a aproximaci v intervalu $\varphi \in <5\%; R_m>$

| Směr odebrání vzorků: 0° | | $n [-]$ | | |
|---------------------------------|------------|----------|-----------|------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \bar{x} | 0,455 | 0,442 | 0,418 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 0,002 | 0,005 | 0,005 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{\min} | 0,453 | 0,436 | 0,412 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{\max} | 0,457 | 0,448 | 0,426 |



Obr. 9.21. Graf hodnot exponentu deformačního zpevnění n pro směr odebrání vzorků 0° a aproximaci v intervalu $\varphi \in <5\%; R_m>$

Při použití druhého intervalu aproximace pro stejný směr odebrání vzorků (0°) a porovnání naměřených hodnot je zřejmé, že interval $\varphi \in <5\%; R_m>$ je poněkud méně přísný než interval $\varphi \in <10;20>\%$. Výsledné hodnoty exponentu deformačního zpevnění n jsou totiž pro tento interval zhruba o **3%** vyšší (pro maximální rychlost deformace $v_{c3} = 600$ mm/min pak cca **1,5%**). Stejně závislosti vyplývají i z tabulek naměřených hodnot pro modul monotónního zpevnění C .

Tab. 9.20. Hodnoty exponentu deformačního zpevnění n pro směr odebrání vzorků 45° a aproximaci v intervalu $\varphi \in <10;20>^\circ$

| Směr odebrání vzorků: 45° | | $n [-]$ | | |
|-------------------------------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \bar{x} | 0,432 | 0,422 | 0,401 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 0,004 | 0,007 | 0,002 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{\min} | 0,426 | 0,413 | 0,398 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{\max} | 0,436 | 0,431 | 0,404 |

Tab. 9.21. Hodnoty exponentu deformačního zpevnění n pro směr odebrání vzorků 90° a aproximaci v intervalu $\varphi \in <10;20>^\circ$

| Směr odebrání vzorků: 90° | | $n [-]$ | | |
|-------------------------------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \bar{x} | 0,423 | 0,414 | 0,396 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{\min} | 0,420 | 0,411 | 0,395 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{\max} | 0,426 | 0,417 | 0,401 |

Tyto dvě tabulky ukazují vliv směru odebrání na velikost exponentu deformačního zpevnění n . Je patrné, že se zvyšujícím se úhlem odebrání vzorku vůči směru válcování ($0^\circ - 45^\circ - 90^\circ$) dochází k postupnému poklesu velikosti exponentu n . Vezmeme-li hodnotu exponentu n pro směr 0° jako 100%, představuje tento pokles cca **1,5-2,5%** mezi směry 0° a 45° . Rozdíl mezi 0° a 90° je zhruba **3,5-4%**. Závislost exponentu deformačního zpevnění n na deformační rychlosti je nepřímo úměrná a představuje nárůst hodnot cca o **2,5%** pro případ změny rychlosti z $v_{c2} = 10$ mm/min na $v_{c1} = 1$ mm/min. V případě maximální deformační rychlosti $v_{c3} = 600$ mm/min pak dochází k poklesu zhruba o **4-5%**.

Tab. 9.22. Hodnoty exponentu deformačního zpevnění n pro směr odebrání vzorků 45° a aproximaci v intervalu $\varphi \in <5\%; R_m>$

| Směr odebrání vzorků: 45° | | $n [-]$ | | |
|-------------------------------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 0,452 | 0,446 | 0,414 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 0,006 | 0,003 | 0,002 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{\min} | 0,441 | 0,440 | 0,412 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{\max} | 0,467 | 0,454 | 0,418 |

Tab. 9.23. Hodnoty exponentu deformačního zpevnění n pro směr odebrání vzorků 90° a aproximaci v intervalu $\varphi \in <5\%; R_m>$

| Směr odebrání vzorků: 90° | | $n [-]$ | | |
|-------------------------------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 0,450 | 0,437 | 0,417 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 0,008 | 0,009 | 0,003 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{\min} | 0,437 | 0,427 | 0,414 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{\max} | 0,457 | 0,449 | 0,422 |

V případě zjišťování exponentu deformačního zpevnění n pomocí aproximačního intervalu $\varphi \in <5\%; R_m>$ jsou výsledky většinou stejné jako předchozí. Rozdíl je však ve velikosti procentuálních změn v porovnávaných hodnotách. Rozdíl mezi různými směry odebrání se pohybuje do **1%**. Jedná se tedy spíše o zanedbatelnou změnu hodnot exponentu n vůči směru odebrání a nelze říci, že velikost ve směru 0° je maximální a naopak ve směru 90° je minimální. Z hlediska vlivu deformační rychlosti posléze platí opět nepřímá úměra mezi touto rychlostí a velikostí exponentu n . Porovnáme-li oba aproximační intervaly mezi sebou, interval $\varphi \in <5\%; R_m>$ vykazuje vyšší hodnoty exponentu n pro všechny sledované závislosti.

Z důvodu lepší aproximace i pro oblast pružných deformací se používá aproximace podle Swifta-Krupkovského:

$$\sigma = C(\varphi_0 + \varphi)^n \text{ [MPa]} \quad (81)$$

kde: φ_0 - posunutí křivky zpevnění pro dosažení meze kluzu při $\varphi = 0$ [-]

Pro nalezení tohoto posunutí křivky zpevnění platí podmínka posunutí smluvní meze kluzu na svislou osu σ (tedy $R_{p0,2}$ při $\varphi_{p0,2} \rightarrow 0$). Vlastní nalezení φ_0 lze pak pomocí této podmínky a aproximační rovnice spočítat následovně:

$$\sigma = C(\varphi_0 + \varphi)^n \quad (82)$$

- podmínka $R_{p0,2}$ při $\varphi_{p0,2} \rightarrow 0$

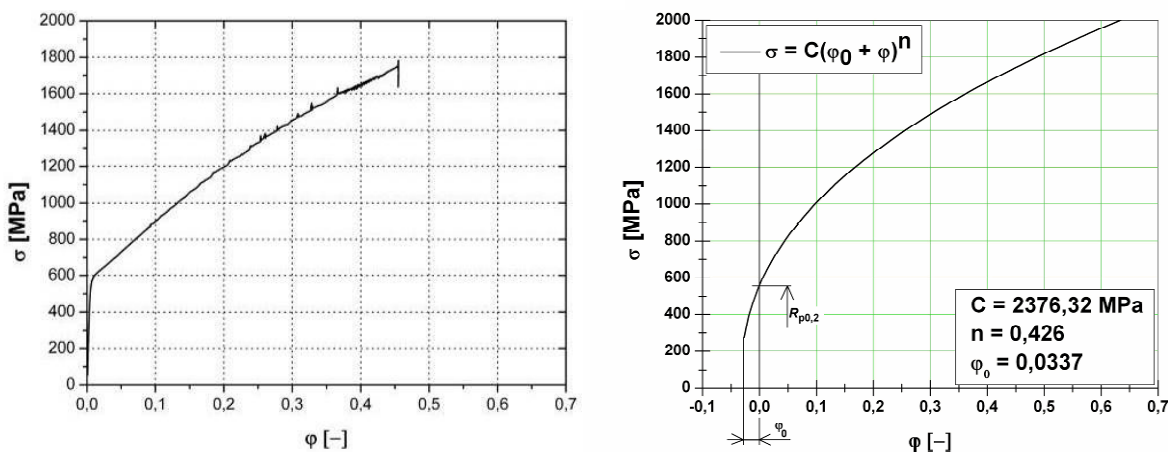
$$\sigma_{p0,2} = C(\varphi_{p0,2} + \varphi_0)^n \quad (83)$$

$$\sigma_{p0,2} = C(0 + \varphi_0)^n \quad (84)$$

$$R_{p0,2}(1 + 0,002) = C\varphi_0^n \quad (85)$$

$$\varphi_0 = \sqrt[n]{\frac{R_{p0,2}(1 + 0,002)}{C}} \quad (86)$$

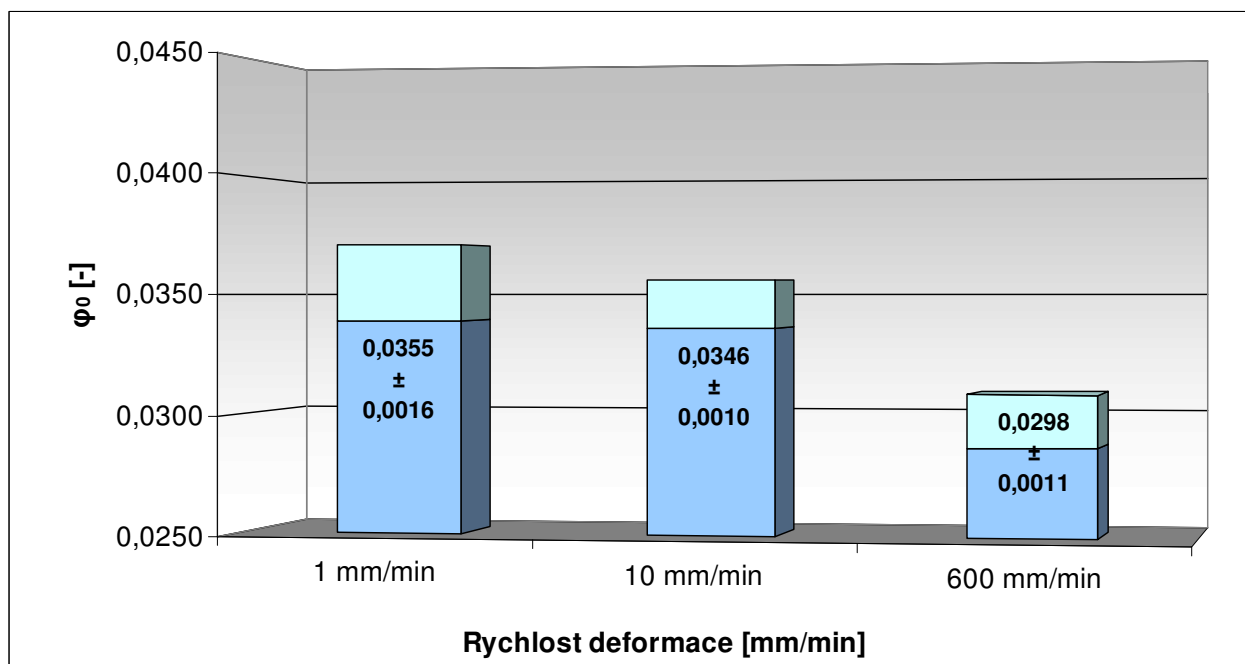
Pomocí rovnice (86) pak byla pro každou sadu měření spočítána hodnota posunutí křivky zpevnění podle aproximace Swifta-Krupkovského. Z prostorových důvodů zde bude uvedena pouze ukázka výsledku pro směr odebrání vzorků 0° a aproximaci v intervalu $\varphi \in <10;20>\%$. Na obr. 9.22. je vidět srovnání skutečného záznamu ze zkoušky tahem a příslušné aproximace pro vzorek č. **0-4** (směr odebrání vzorku 0° a rychlost deformace 10 mm/min).



Obr. 9.22. Porovnání záznamu ze zkoušky tahem a aproximace pro vzorek č. **0-4**

Tab. 9.24. Hodnoty posunutí křivky zpevnění φ_0 pro směr odebrání vzorků 0° a interpolaci v intervalu $\varphi \in <10;20>\%$

| Směr odebrání vzorků: 0° | | φ_0 [-] | | |
|-------------------------------------|------------------------------|-----------------|---------------|---------------|
| Rychlost deformace | | 1 mm/min | 10 mm/min | 600 mm/min |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 0,0355 | 0,0346 | 0,0298 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 0,0016 | 0,0010 | 0,0011 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{\min} | 0,0341 | 0,0337 | 0,0287 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{\max} | 0,0381 | 0,0362 | 0,0312 |



Obr. 9.23. Hodnoty posunutí křivky zpevnění φ_0 pro směr odebrání vzorků 0° a interpolaci v intervalu $\varphi \in <10;20>\%$

Hodnoty velikosti posunutí křivky zpevnění φ_0 jsou především orientační a slouží spíše k lepšímu matematickému popsání naměřených tahových zkoušek. Z tohoto důvodu jsou zde uvedeny pouze hodnoty pro směr odebrání vzorků 0° a aproximační interval $\varphi \in <10;20>\%$. Ukazuje se, že i pro tento případ platí stejné závislosti jako v předešlých veličinách. Ostatní naměřené hodnoty (směry 45° a 90° a aproximační interval $\varphi \in <5\%; R_m>$) budou vloženy do příloh této disertační práce (na CD).

9.4. Vliv teplotního cyklu na mechanické vlastnosti

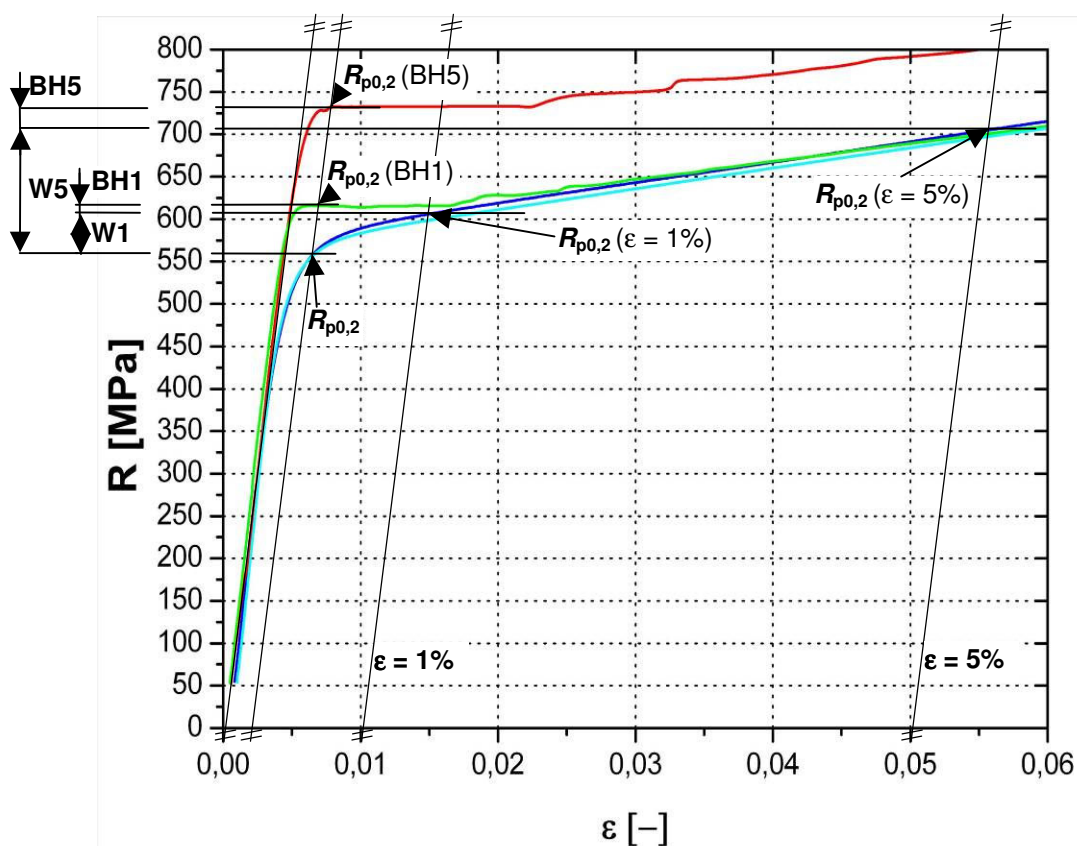
Zjišťování vlivu teplotního cyklu na materiálové charakteristiky testovaného materiálu bylo provedeno pomocí statické zkoušky tahem. Jednalo se o klasický průběh zkoušky dle normy ČSN EN 10002-1. Vzorky pro zkoušku jednoosým tahem byly odebrány ve směru válcování (0°) metodou dělení vodním paprskem s abrazivem. Dodatečná úprava vzorků spočívala v obroušení řezných hran tyček. Statická zkouška tahem byla provedena na stroji TIRAtest 2300 s použitím vyhodnocení naměřených dat pomocí programu Labtest 4.01. Tento programový systém vyhodnocuje všechny základní charakteristiky ($R_{p0,2}$, R_m , A_{50mm}). Počáteční délka měřeného úseku L_0 tedy byla 50 mm (A_{50mm}). K vlastnímu statistickému vyhodnocení bylo opět použito 5 vzorků. Vlastní teplotní cyklus představoval čas potřebný v lakovně k vytvrzení laku na karoserii automobilu (170°C po dobu 20 min). Z tohoto důvodu je také samotné zpracování teplotním cyklem v této práci označováno jako **BH (Bake Hardening)**.

Velikost předdeformace byla volena na základě výsledků statické zkoušky tahem nevytvrzeného materiálu bez předdeformace. Konkrétně se jednalo o hodnoty předdeformace $\varepsilon = 1\%$ a $\varepsilon = 5\%$. Všechny předdeformované vzorky byly podrobeny tepelnému cyklu (170°C a doba 20 min.). Následovalo dolomení vzorků za stejných podmínek. V tab. 9.25. je vysvětleno názvosloví použitých vzorků.

Tab. 9.25. Označení vzorků pro měření vlivu BH efektu a předdeformace

| Označení | Význam |
|------------|--|
| BH0 | Vzorky podrobené pouze teplotnímu cyklu (170° po dobu 20 min) |
| BH1 | Předdeformované vzorky ($\varepsilon = 1\%$) a poté podrobeny teplotnímu cyklu (170° po dobu 20 min) |
| BH5 | Předdeformované vzorky ($\varepsilon = 5\%$) a poté podrobeny teplotnímu cyklu (170° po dobu 20 min) |
| W1 | Pracovní zpevnění při velikosti předdeformace $\varepsilon = 1\%$ |
| W5 | Pracovní zpevnění při velikosti předdeformace $\varepsilon = 5\%$ |

Měření probíhalo za deformační rychlosti 10 mm/min. Výsledek je následně zobrazen v grafech jako velikost $R_{p0,2}$. Podle předpokladu se potvrdilo, že samotný teplotní cyklus nemá vliv na velikost smluvní meze kluzu materiálu TWIP 1200. Rozdíl mezi smluvní mezí kluzu (viz. tab. 9.6.) a touto hodnotou po vytvrzení vzorků (viz. tab. 9.26.) je zanedbatelný a v rámci statistické chyby. Hodnota BH0 se tedy téměř rovná velikosti smluvní meze kluzu pro vzorky bez teplotního cyklu. Pro předdeformované vzorky ($\varepsilon = 1\%$ a $\varepsilon = 5\%$) bylo po provedení statické zkoušky tahem vypočteno pracovní zpevnění (W1 a W5) a stanoven BH efekt pro dané skupiny vzorků (BH1 a BH5). Vlastní vyjádření všech sledovaných hodnot je dále zobrazeno na obr. 9.24. Na tomto obrázku je tmavě modrou barvou zobrazena křivka zpevnění pro normální podmínky měření, světle modrá barva odpovídá křivce zpevnění pro materiál podrobený teplotnímu cyklu (BH0). Je vidět, že pro tento případ je BH efekt téměř zanedbatelný. Zelená křivka zobrazuje výsledek statické tahové zkoušky pro vzorek podrobený předdeformaci $\varepsilon = 1\%$ a teplotnímu cyklu. Červená barva odpovídá velikosti předdeformace $\varepsilon = 5\%$ a teplotnímu cyklu.



Obr. 9.24. Grafické znázornění výpočtu BH efektu a pracovního zpevnění při různých stavech předdeformace

Tab. 9.26. Hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ pro teplotní cyklus a předdeformaci

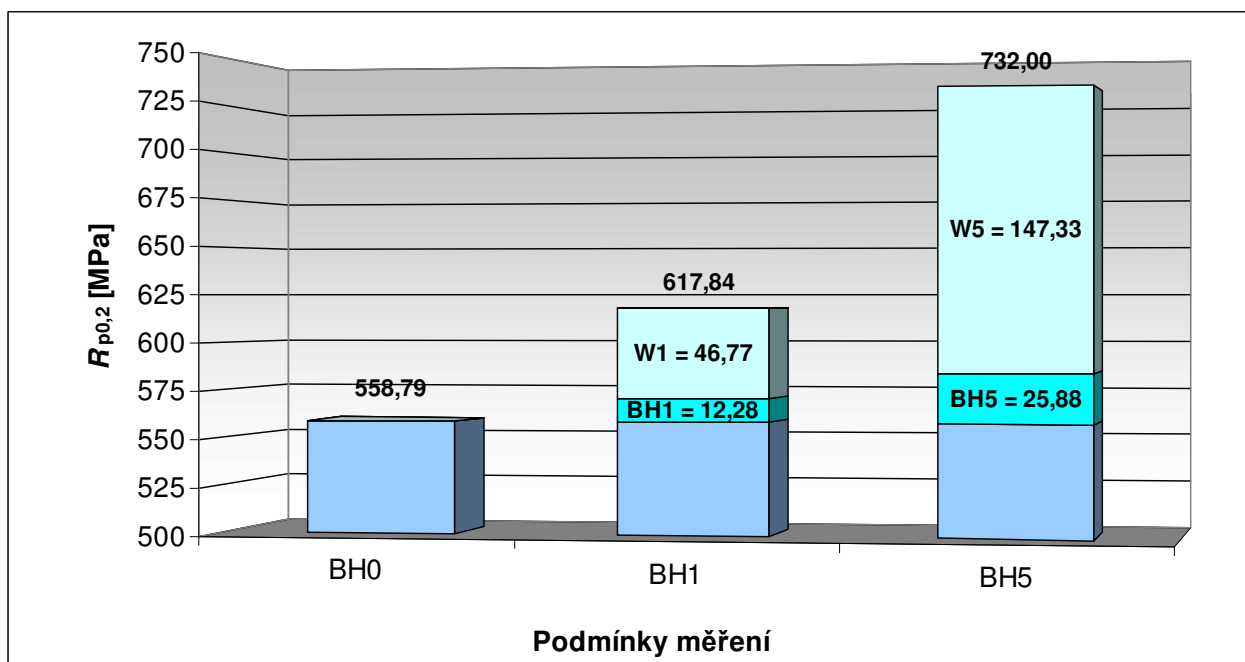
| Směr odebrání vzorků: 0° | | $R_{p0,2}$ [MPa] | | |
|-------------------------------------|------------------------|------------------|---------------|---------------|
| Podmínky měření | | BH0 | BH1 | BH5 |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 553,39 | 617,84 | 732,00 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 6,65 | 5,88 | 4,20 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 546,22 | 611,27 | 726,23 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 561,15 | 625,57 | 737,46 |

Z naměřených hodnot velikosti smluvních mezí kluzu a grafického znázornění vyplývá následující výpočet sledovaných hodnot. Výsledky jsou sepsány v tab. 9.27.

- srovnání na velikosti předdeformace $\epsilon = 1\%$:
 - z grafu lze odečíst, že $R_{p0,2}$ vzrostla na hodnotu $R_{p0,2} (\epsilon = 1\%) = 605,56 \text{ MPa}$
 - $W1 = R_{p0,2} (\epsilon = 1\%) - R_{p0,2} = 46,77 \text{ MPa}$
 - $BH1 = R_{p0,2} (BH1) - W1 - R_{p0,2} = 12,28 \text{ MPa}$
- srovnání na velikosti předdeformace $\epsilon = 5\%$:
 - $R_{p0,2} (\epsilon = 5\%) = 706,12 \text{ MPa}$
 - $W5 = R_{p0,2} (\epsilon = 5\%) - R_{p0,2} = 147,33 \text{ MPa}$
 - $BH5 = R_{p0,2} (BH5) - W5 - R_{p0,2} = 25,88 \text{ MPa}$

Tab. 9.27. Hodnoty sledovaných hodnot pro teplotní cyklus a předdeformaci

| Podmínky měření | BH efekt [MPa] | Pracovní zpevnění W [MPa] |
|-----------------|----------------|---------------------------|
| BH0 | 0 | 0 |
| BH1 | 12,88 | 46,77 |
| BH5 | 25,88 | 147,33 |



Obr. 9.25. Velikosti BH efektu a pracovního zpevnění při různých stavech předdeformace

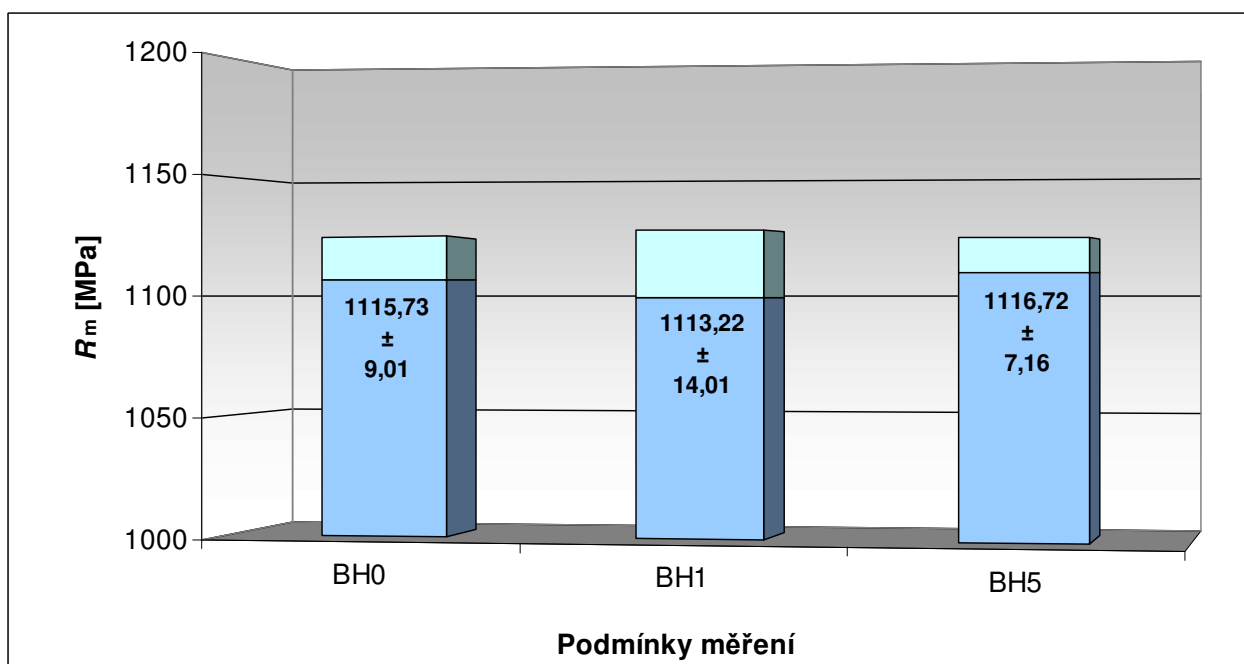
Z tab. 9.27. je vidět vliv teplotního cyklu a předdeformace na výslednou velikost meze pevnosti R_m pro materiál TWIP 1200. Z výsledků je patrné, že předdeformace vzorků nemá vliv na velikost meze pevnosti. Výsledné maximální napětí pro sledovaný materiál tedy nezávisí na předešlé historii namáhání. Vliv BH efektu na mez pevnosti je podobný trendu, který byl pozorován již pro mez kluzu a sice, že BH efekt pouze nepatrně ovlivňuje mez pevnosti (1126 MPa resp. 1115 MPa). Tento jev je poměrně dobře vidět podle srovnání základních materiálových charakteristik ze zkoušky tahem a vlivu teplotního cyklu (podmínky BH0), jak je podáno v tab. 9.28.

Tab. 9.28. Srovnání výsledků ze statické zkoušky tahem a vlivu teplotního cyklu

| Základní mechanické hodnoty | | Směr odebrání vzorků: 0° Rychlost deformace: 10 mm/min | |
|-----------------------------|-------|---|----------------|
| | | Statická zkouška tahem | BH0 |
| $R_{p0,2}$ | [MPa] | 558,79 ± 4,94 | 553,39 ± 6,65 |
| R_m | [MPa] | 1125,57 ± 4,67 | 1115,73 ± 9,01 |
| A_{50mm} | [%] | 58,14 ± 2,75 | 59,39 ± 0,69 |

Tab. 9.29. Hodnoty meze pevnosti R_m pro teplotní cyklus a předdeformaci

| Směr odebrání vzorků: 0° | | R_m [MPa] | | |
|---------------------------------|------------|-------------|---------|---------|
| Podmínky měření | | BH0 | BH1 | BH5 |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 1115,73 | 1113,22 | 1116,72 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 9,01 | 14,01 | 7,16 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{\min} | 1103,55 | 1097,26 | 1111,14 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{\max} | 1124,62 | 1130,57 | 1128,88 |

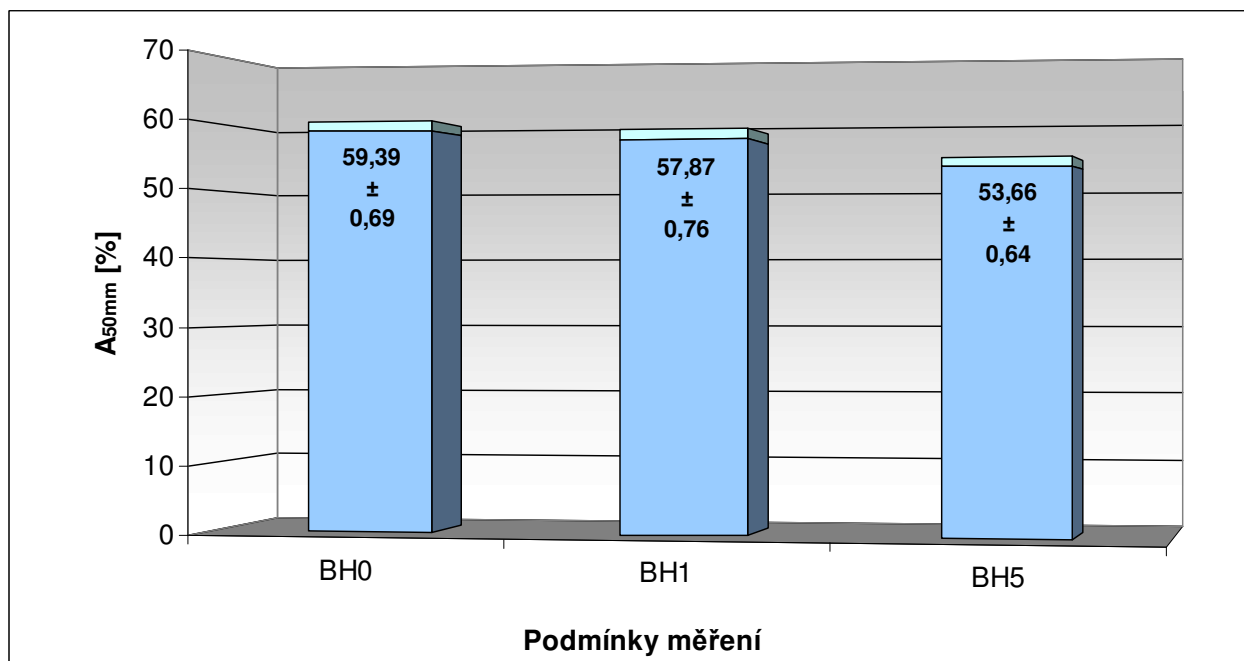


Obr. 9.26. Hodnoty meze pevnosti R_m pro teplotní cyklus a předdeformaci

Z obr. 9.26. je patrné, že předdeformace a její velikost zdaleka neovlivňuje výslednou mez pevnosti materiálu TWIP 1200. Změřené velikosti R_m se pro všechny podmínky měření pohybují kolem 1115 MPa. Tato skutečnost by měla být ve shodě s výsledky KMP pro naměřené DMP, kde byla jako velikost předdeformace volena 1/3 resp. 2/3 velikosti dosažené výšky vrchlíku. Jako 100% byly brány výsledky z měření DMP pro rychlost tažníku $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4}$ m/s. Ukazuje se, že velikost předdeformace sice snižuje výslednou hodnotu tažnosti $A_{50\text{mm}}$, ale nemá velký vliv na dosaženou velikost síly F_{\max} .

Tab. 9.30. Hodnoty tažnosti A_{50mm} pro teplotní cyklus a předdeformaci

| Směr odebrání vzorků: 0° | | A_{50mm} [%] | | |
|---------------------------------|-----------|----------------|-------|-------|
| Podmínky měření | | BH0 | BH1 | BH5 |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \bar{x} | 59,39 | 57,87 | 53,66 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 0,69 | 0,76 | 0,64 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 58,46 | 56,96 | 52,54 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 60,35 | 58,78 | 54,14 |



Obr. 9.27. Hodnoty tažnosti A_{50mm} pro teplotní cyklus a předdeformaci

V případě srovnání velikosti tažnosti A_{50mm} je z grafů opět patrný téměř nulový vliv na celkovou tažnost od samotného teplotního cyklu. Konkrétně se jedná o hodnoty $A_{50mm} = 58,14 \pm 2,75$ (statická zkouška tahem) a $A_{50mm} = 59,39 \pm 0,69$ v případě podmínek měření označené jako BH0. V případě následných velikostí předdeformace $\varepsilon = 1\%$ a $\varepsilon = 5\%$ představuje pokles tažnosti ΔA_{50mm} (BH1) = 1,52% a ΔA_{50mm} (BH5) = 5,73%. Tyto hodnoty poměrně velice přesně odpovídají provedené velikosti předdeformace. Pro materiál TWIP 1200 lze tedy předpokládat přímou úměrnost mezi velikostí provedené předdeformace a výslednou tažností A_{50mm} .

Tab. 9.31. Hodnoty modulu monotónního zpevnění **C** pro teplotní cyklus, předdeformaci a interpolaci v intervalu $\varphi \in <10;20>\%$

| Směr odebrání vzorků: 0° | | C [MPa] | | |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Podmínky měření | | BH0 | BH1 | BH5 |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 2336,632 | 2258,249 | 2144,129 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 30,890 | 47,179 | 28,135 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 2300,238 | 2208,907 | 2115,425 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 2380,463 | 2334,198 | 2186,062 |

Tab. 9.32. Hodnoty exponentu deformačního zpevnění **n** pro teplotní cyklus, předdeformaci a interpolaci v intervalu $\varphi \in <10;20>\%$

| Směr odebrání vzorků: 0° | | n [-] | | |
|-------------------------------------|------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Podmínky měření | | BH0 | BH1 | BH5 |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 0,424 | 0,404 | 0,340 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 0,006 | 0,008 | 0,006 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 0,417 | 0,395 | 0,334 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 0,432 | 0,414 | 0,351 |

Tab. 9.33. Hodnoty posunutí křivky zpevnění φ_0 pro teplotní cyklus, předdeformaci a interpolaci v intervalu $\varphi \in <10;20>\%$

| Směr odebrání vzorků: 0° | | φ_0 [-] | | |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|
| Podmínky měření | | BH0 | BH1 | BH5 |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 0,0336 | 0,0406 | 0,0427 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 0,0009 | 0,0025 | 0,0005 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 0,0321 | 0,0381 | 0,0423 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 0,0344 | 0,0435 | 0,0435 |

Tab. 9.34. Hodnoty modulu monotónního zpevnění **C** pro teplotní cyklus, předdeformaci a interpolaci v intervalu $\varphi \in <5\%; R_m>$

| Směr odebrání vzorků: 0° | | C [MPa] | | |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Podmínky měření | | BH0 | BH1 | BH5 |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 2442,058 | 2408,792 | 2262,965 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 21,311 | 23,101 | 14,757 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 2416,722 | 2386,082 | 2246,133 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 2474,297 | 2435,128 | 2285,842 |

Tab. 9.35. Hodnoty exponentu deformačního zpevnění **n** pro teplotní cyklus, předdeformaci a interpolaci v intervalu $\varphi \in <5\%; R_m>$

| Směr odebrání vzorků: 0° | | n [-] | | |
|-------------------------------------|------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Podmínky měření | | BH0 | BH1 | BH5 |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 0,441 | 0,432 | 0,362 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 0,007 | 0,015 | 0,002 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 0,431 | 0,410 | 0,360 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 0,447 | 0,450 | 0,364 |

Tab. 9.36. Hodnoty posunutí křivky zpevnění φ_0 pro teplotní cyklus, předdeformaci a interpolaci v intervalu $\varphi \in <5\%; R_m>$

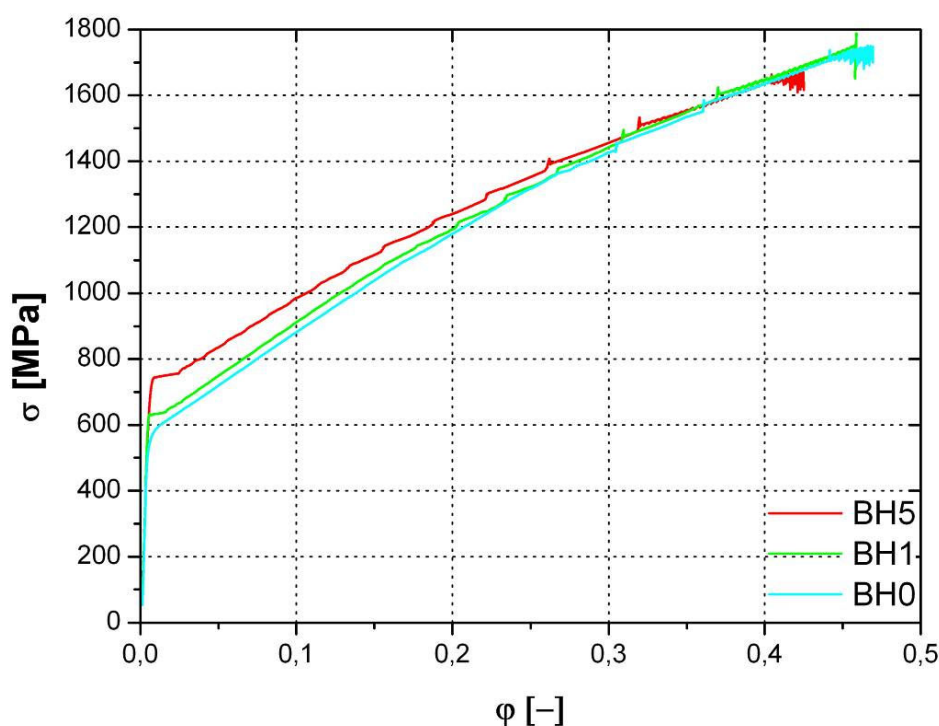
| Směr odebrání vzorků: 0° | | φ_0 [-] | | |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|
| Podmínky měření | | BH0 | BH1 | BH5 |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 0,0347 | 0,0432 | 0,0445 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 0,0010 | 0,0036 | 0,0003 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 0,0329 | 0,0379 | 0,0441 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 0,0355 | 0,0471 | 0,0448 |

Z výsledků aproximace křivek zpevnění pro teplotní cyklus a předdeformaci pro materiál TWIP 1200 a jejich porovnání s výsledky ze statické zkoušky tahem pro stejný směr odebrání vzorků (0°) a stejnou rychlost deformace (10 mm/min) je vidět již zmíněná skutečnost, že pro tento materiál nemá BH efekt téměř žádný vliv. Jak velikost modulu monotónního zpevnění **C**, tak hodnoty exponentu deformačního zpevnění **n** pro obě podmínky měření (statická zkouška tahem a BH0) a pro oba aproximační intervaly jsou téměř shodné – viz tab. 9.37.

Tab. 9.37. Srovnání **C** a **n** pro obě podmínky měření a 2 intervaly aproximace

| Směr odebrání vzorků: 0° | | Statická zkouška tahem | BH0 | Statická zkouška tahem | BH0 |
|---------------------------------|-------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|
| Interval aproximace | | $\varphi \in <10;20>\%$ | | $\varphi \in <5\%;R_m>$ | |
| C | [MPa] | 2366,386 | 2336,632 | 2460,120 | 2442,058 |
| n | [-] | 0,428 | 0,424 | 0,442 | 0,441 |

Na obr. 9.28. jsou typické tvary křivek zpevnění pro všechny podmínky měření (BH0, BH1, BH5). Je patrný klesající sklon křivek, který odpovídá spočítaným výsledkům pro **C**, **n** a φ_0 . Tato závislost platí pro oba aproximační intervaly, kde interval $\varphi \in <10;20>\%$ má opět nižší hodnoty než $\varphi \in <5\%;R_m>$.



Obr. 9.28. Srovnání křivek zpevnění (BH0, BH1, BH5)

9.5. Dílčí závěr (statická zkouška tahem)

V případě statické zkoušky tahem byly jako hlavní parametry testování zvoleny tři rychlosti deformace (1, 10 a 600 mm/min). Vzorky byly odebrány ve třech hlavních směrech (0, 45 a 90°) vůči směru válcování daného materiálu. Zjišťovanými charakteristikami daného materiálu byly mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m a tažnost A_{50mm} (takto zvolena v důsledku množství materiálu). Z naměřených hodnot byly následně pomocí softwaru **OriginPro 7.5** vypočteny velikosti modulu monotónního zpevnění C , exponentu deformačního zpevnění n a posunutí křivky zpevnění φ_0 . Jako intervaly aproximace byly použity hodnoty dle dvou základních norem a sice $\varphi \in <10;20>\%$ a $\varphi \in <5\%;R_m>$. Následně byl pro všechny tyto sledované veličiny zjišťován vliv teplotního cyklu a velikosti provedené předdeformace. Získané výsledky byly zaznamenány pomocí matematické statistiky do tabulek a grafů, které odpovídají jednotlivým podmínkám měření.

Dosažené pevnostní charakteristiky materiálu dokládají jeho velmi vysokou pevnost. Mez kluzu $R_{p0,2}$ dosahuje hodnot kolem **590 MPa** a mez pevnosti R_m přesahuje hranici **1100 MPa** (s výjimkou při rychlosti deformace $v_{c3} = 600$ mm/min, kde se pohybuje cca 50 MPa pod touto hodnotou). Takovéto hodnoty obou mezí odpovídají charakteristickým hodnotám pro ostatní vysokopevnostní materiály. Z hlediska naměřených hodnot a jejich srovnání vůči směru odebrání vzorků se ukázalo, že neexistuje téměř žádná směrovost vlastností a materiál je izotropní.

Hodnota tažnosti A_{50mm} se však zcela vymyká z této skupiny materiálů. V závislosti na rychlosti deformace se pohybuje mezi **50÷60%**, což jsou hodnoty typické pro hlubokotažné materiály. Podle naměřených výsledků existuje nepřímá úměra mezi rychlostí deformace a tažností A_{50mm} .

Jedná se tedy o naprosto novou skupinu materiálových charakteristik a k bližšímu popsání chování testovaného materiálu nestačily pouze výstupní protokoly ze statické zkoušky tahem, ale bylo také třeba provést měření moderními snímacími metodami. Bylo použito optické zařízení na snímání deformace **ARAMIS – v6.1.1-2** od německé firmy GOM. Na základě výsledků se potvrdil předpoklad postupného protváření celého objemu (bez lokalizace napětí v krčku) díky procesu mechanického dvojčatění, který tak umožňuje dosáhnout velkých přetvoření i za vyšších napětí. Také podle tohoto měření je patrné, že se jedná o neustálé zpevňování materiálu.

Velikosti koeficientů **C** a **n** při aproximaci křivky zpevnění jsou poměrně značně posunuty do vyšších hodnot. Modul monotónního zpevnění dosahuje hodnot kolem **2350 MPa**, exponent deformačního zpevnění se pohybuje v rozmezí **0,42÷0,44**. Všechny hodnoty jsou také nepřímo závislé na zvětšující se rychlosti deformace. Při srovnání obou použitých intervalů se ukázalo, že interval $\varphi \in <5\%; R_m>$ je poněkud méně „přísný“ a hodnoty zjištěné v tomto intervalu jsou vyšší než pro $\varphi \in <10;20>\%$.

Jestliže byl materiál podroben teplotnímu cyklu, který svými parametry odpovídal podmínkám během vypalování laku karoserie, podle předpokladů bylo prokázáno, že u tohoto materiálu téměř nedochází ke zvyšování meze kluzu $R_{p0,2}$ vlivem tepelného zatížení (BH efekt). Testovaný materiál byl také podroben určitému stupni předdeformace ($\varepsilon = 1\%$ a $\varepsilon = 5\%$) a následně opět teplotně namáhán. Získané výsledky představují velikost pracovního zpevnění pro obě hodnoty předdeformace (**W1 = 46,77 MPa** a **W5 = 147,33 MPa**). Ovlivnění celkové tažnosti A_{50mm} je dáno pouze velikostí předdeformace – dochází tedy k jejímu snížení cca o 1 resp. 5%. Z hlediska výsledné meze pevnosti R_m po zatížení teplotním cyklem a předdeformací je patrné, že tato změna podmínek nesnižuje jeho velikost ($R_m \approx 1120 \text{ MPa}$).

V tab. 9.38. je stručný souhrn základních mechanických hodnot pro sledované podmínky měření a směr odebrání vzorků 0° . Hodnoty pro koeficienty aproximace křivky zpevnění jsou vždy zaznamenány ve dvojici – v horní části řádek odpovídá intervalu $\varphi \in <10;20>\%$ a v dolní intervalu $\varphi \in <5\%; R_m>$.

Tab. 9.38. Základní mechanické hodnoty materiálu **TWIP 1200** pro směr 0°

| Podmínky měření | | Rychlost deformace [mm/min] | | | Teplotní cyklus a předdeformace | | |
|-----------------|-------|-----------------------------|---------|---------|---------------------------------|---------|---------|
| | | 1 | 10 | 600 | BH0 | BH1 | BH5 |
| $R_{p0,2}$ | [MPa] | 562,34 | 558,79 | 525,34 | 553,39 | 617,84 | 732,00 |
| R_m | [MPa] | 1164,69 | 1125,56 | 1052,95 | 1115,73 | 1113,22 | 1116,72 |
| A_{50mm} | [%] | 62,69 | 58,14 | 47,74 | 59,39 | 57,87 | 53,66 |
| C | [MPa] | 2458,9 | 2366,4 | 2238,7 | 2336,6 | 2258,2 | 2144,1 |
| | | 2574,4 | 2460,1 | 2294,0 | 2442,1 | 2408,8 | 2263,0 |
| n | [-] | 0,441 | 0,428 | 0,412 | 0,424 | 0,404 | 0,340 |
| | | 0,455 | 0,442 | 0,418 | 0,441 | 0,432 | 0,362 |
| φ_0 | [-] | 0,0355 | 0,0346 | 0,0298 | 0,0336 | 0,0406 | 0,0427 |
| | | 0,0353 | 0,0350 | 0,0297 | 0,0347 | 0,0432 | 0,0445 |

10. Vliv technologie přípravy vzorků na následné materiálové vlastnosti

V průběhu měření a především přípravy vzorků pro statickou zkoušku tahem se dalo vyzkoušet, že pro daný materiál a jeho následné mechanické vlastnosti je velmi důležité zvolit správnou technologii přípravy vzorků. Ukázalo se, že běžná technologie stříhání, která se používá např. pro hlubokotažné materiály, je pro materiál TWIP 1200 naprosto nevhodná. Nevyužívá totiž v plné šíři vlastnosti, které zkoumaný materiál poskytuje.

Jevilo se tedy jako vhodné provést měření pomocí statické zkoušky tahem pro vzorky připravené pomocí různých technologií a následné porovnání základních mechanických vlastností těchto vzorků. Byly vybrány tři základní technologie vhodné pro přípravu vzorků, které byly porovnány s technologií řezání vzorků vodním paprskem s následným jemným broušením, která se využívala pro zjišťování všech hodnot při měření statickou zkouškou tahem.

Konkrétně se jednalo o následující technologie:

- 1) **Stříhání** – vzorky byly nastříhány na požadovaný rozměr na tabulových nůžkách. Jedná se o technologii, která je běžně využívána v automobilovém průmyslu na nástřihových linkách.
- 2) **Frézování** – nastříhané vzorky byly následně podrobeny frézování po celé měřené délce vzorku. Nutno dodat, že daný materiál se jevil vzhledem k otupení nástroje a vzhledu povrchu (viz obr. 10.6.) jako naprosto nevhodný pro tuto obráběcí technologii.
- 3) **Broušení** – vzorky byly opět nejprve nastříhány a poté podrobeny broušení po celé délce hrany vzorku. V porovnání s frézováním je daný materiál určitě méně náchylný na tuto dokončovací operaci.
- 4) **Jemné broušení** – vzorky byly připraveny jednou z nekonvenčních přípravných technologií. Konkrétně se jednalo o řezání vodním paprskem. Následně byly vzorky podrobeny jemnému broušení.

Je však potřeba zdůraznit, že samotná technologie přípravy vzorků má hlavní význam především pro samotné vzorky než pro budoucí širší uplatnění v průmyslu.

Pro každou sadu měření bylo připraveno zhruba 8 vzorků. Do vlastního vyhodnocení pak bylo vždy použito 5 vzorků. Z těchto vzorků byly následně vypočítány základní statistické charakteristiky daných souborů (viz tab. 10.1. – 10.3.). Měření probíhalo na přístroji **TIRAtest 2300** (viz obr. 9.1.) za následujících podmínek testování:

- rychlost deformace: 10 mm/min,
- počáteční délka zkušební tyčky: $L_0 = 50$ mm,
- tloušťka zkušební tyčky: $t = 1,49$ mm,
- směr odebrání vzorků: 0° .

Vyhodnocovány byly stejné charakteristiky jako v případě měření základních mechanických vlastností. Jednalo se tedy o smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m a tažnost A_{50mm} . Zde již nebyly pomocí softwaru OriginPro 7.5 hledány velikosti modulu monotónního zpevnění C a exponentu deformačního zpevnění n .

Pro přesnější představu a pochopení vlivů různých přípravných technologií byly vzorky podrobeny sledování pod mikroskopem **Leica DM2500P** (viz obr. 10.1.) pro tvorbu snímků lomové (stříhání) a obrobené plochy (frézování, broušení a jemné broušení). Snímky samotné střížné hrany byly provedeny pomocí mikroskopu **NEOPHOT 21** v metalografické laboratoři Katedry strojírenské technologie.

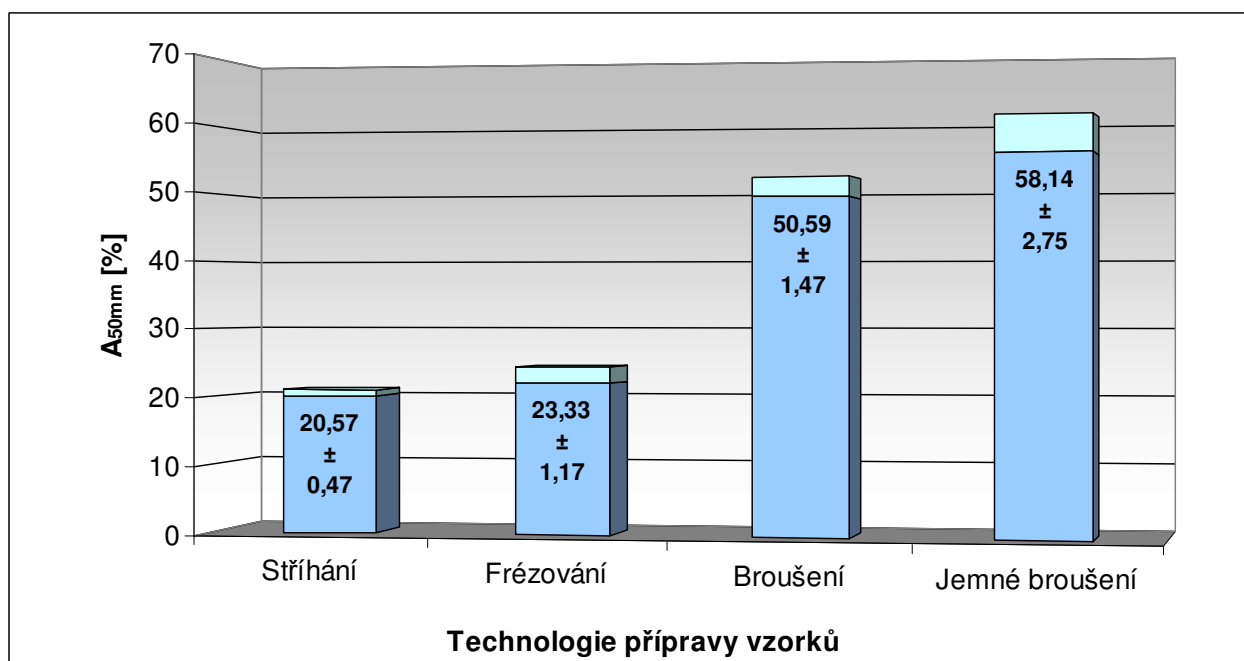


Obr. 10.1. Mikroskop **Leica DM2500P** (laboratoř zkoušení plastů)

Na následujících stránkách jsou pomocí tabulek a grafů (v případě tažnosti A_{50mm} a meze pevnosti R_m) zpracovány výsledky pro všechny sledované přípravné technologie. Stejně jako v případě samotného měření statické zkoušky tahem i zde se statisticky vyhodnocoval aritmetický průměr \bar{x} , výběrová směrodatná odchylka s , **minimum** a **maximum** z naměřených hodnot.

Tab. 10.1. Hodnoty tažnosti A_{50mm} pro různé technologie přípravy vzorků

| Směr odebrání vzorků: 0° | | A_{50mm} [%] | | | |
|-------------------------------------|-----------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| Technologie přípravy vzorků | | Stříhání | Frézování | Broušení | Jemné br. |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \bar{x} | 20,57 | 23,33 | 50,59 | 58,14 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 0,47 | 1,17 | 1,47 | 2,75 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{min} | 19,89 | 21,88 | 48,80 | 55,02 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{max} | 21,08 | 24,68 | 52,43 | 61,34 |



Obr. 10.2. Graf hodnot tažnosti A_{50mm} pro různé technologie přípravy vzorků

Tab. 10.2. Hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ pro různé technologie přípravy vzorků

| Směr odebrání vzorků: 0° | | $R_{p0,2}$ [MPa] | | | |
|-------------------------------------|------------|------------------|---------------|---------------|---------------|
| Technologie přípravy vzorků | | Stříhání | Frézování | Broušení | Jemné br. |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 563,05 | 568,12 | 562,78 | 558,79 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 4,89 | 2,35 | 4,51 | 4,94 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{\min} | 554,89 | 564,79 | 558,63 | 554,47 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{\max} | 567,75 | 570,46 | 568,86 | 567,21 |

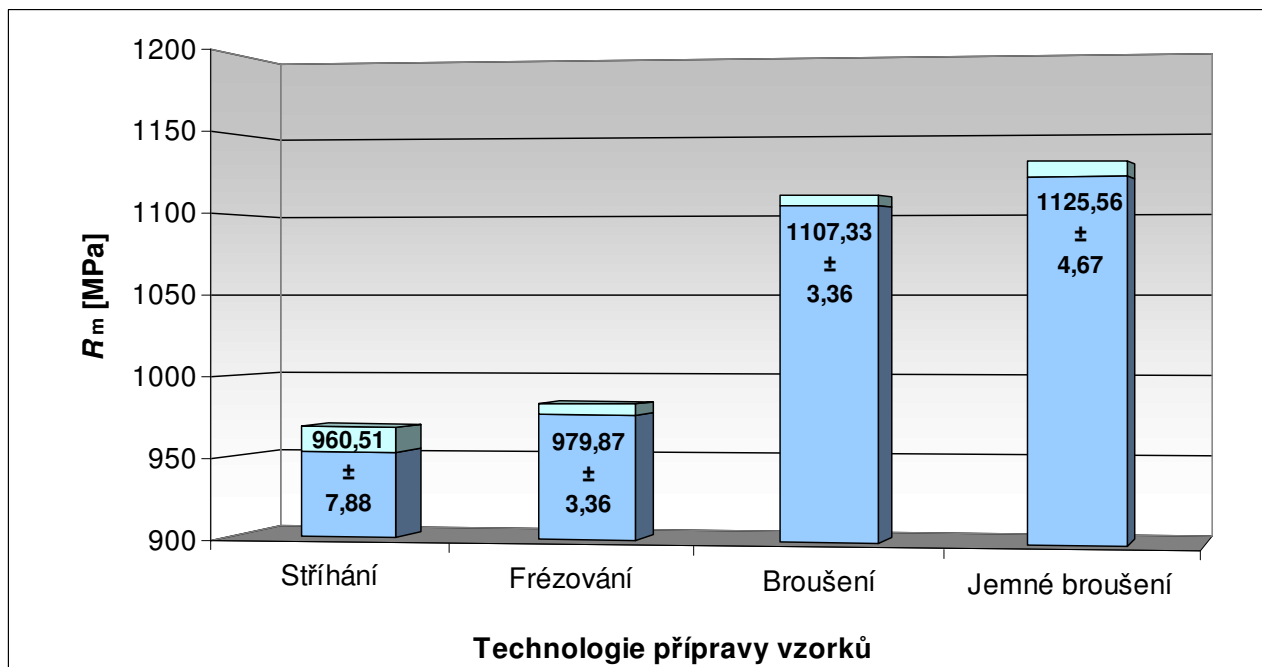
Tab. 10.3. Hodnoty meze pevnosti R_m pro různé technologie přípravy vzorků

| Směr odebrání vzorků: 0° | | R_m [MPa] | | | |
|-------------------------------------|------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| Technologie přípravy vzorků | | Stříhání | Frézování | Broušení | Jemné br. |
| Celkový počet naměřených hodnot | N | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Aritmetický průměr | \square | 960,51 | 979,87 | 1107,33 | 1125,56 |
| Výběrová směrodatná odchylka | s | 7,88 | 3,36 | 3,36 | 4,67 |
| Minimum z naměřených hodnot | x_{\min} | 947,79 | 975,42 | 1103,09 | 1118,65 |
| Maximum z naměřených hodnot | x_{\max} | 967,97 | 982,94 | 1111,45 | 1131,77 |

Z naměřených výsledků je zřejmý poměrně velký vliv daných přípravných technologií na následné mechanické vlastnosti vzorků. Zvolené technologie se celkem vhodně dají rozdělit na dvě hlavní skupiny.

První je tvořena **technologemi stříhání a frézování**. Hodnoty tažnosti A_{50mm} zde dosahují cca pouze 37% výsledků zjištěných pro technologii jemného broušení. Lze zkonstatovat, že tyto dvě technologie jsou velmi nevhodné pro testovaný materiál a to především z hlediska skutečného využití vlastností, které tento materiál poskytuje. Tyto přípravné technologie vnášejí do materiálu poměrně značné množství mikrotrhlin. V případě frézování se dá dokonce hovořit o jistém „rozbití“ struktury povrchu materiálu (viz obr. 10.6. a 10.7.).

Druhou hlavní skupinu tvoří **technologie broušení a jemného broušení**. Broušení samotné dosahuje cca 88% hodnoty tažnosti A_{50mm} pro jemné broušení. Tento rozdíl je dán patrně jinak zvolenou technologií samotné přípravy. Zatímco vzorky označované jako broušené byly nejprve stříhány a posléze broušeny na brusce, vzorky označované jako jemné broušení byly nařezány vodním paprskem (aby nedošlo k teplotnímu ovlivnění pásma řezu) a následně jemně zbroušeny. Na obr. 10.3. jsou vidět hodnoty meze pevnosti R_m pro dané technologie přípravy vzorků. Je zřejmé, že dané hodnoty jsou úměrné hodnotám tažnosti A_{50mm} a podávají tak jisté hranice použitelnosti daného materiálu (z hlediska smluvního napětí nebo poměrného prodloužení) připraveného danou technologií.

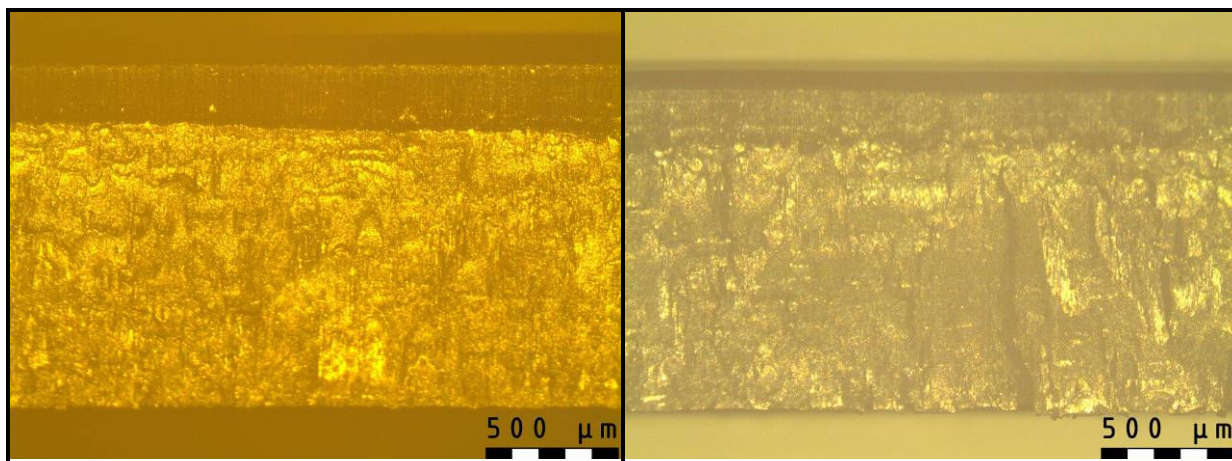


Obr. 10.3. Graf hodnot meze pevnosti R_m pro různé technologie přípravy vzorků

Z uvedených výsledků a grafických znázornění je zřejmé, že vezmeme-li porovnání např. s hlubokotažnými materiály, které lze připravovat na nástřihových linkách pomocí technologie stříhání, zde se tato technologie příliš využít nedá. O jistém využití stříhání se dá možná hovořit pouze v případě menšího přetvoření vyráběného dílu (cca do 15%). Zde je však otázkou, jak by se daný materiál choval při provozním zatížení. Obecně sice platí, že velké deformace se vyskytují především dále od hrany polotovaru. Přesto se domnívám, že vzhledem k vysokému počtu mikrotrhlin na povrchu vzorku by výrobek byl poměrně nebezpečný.

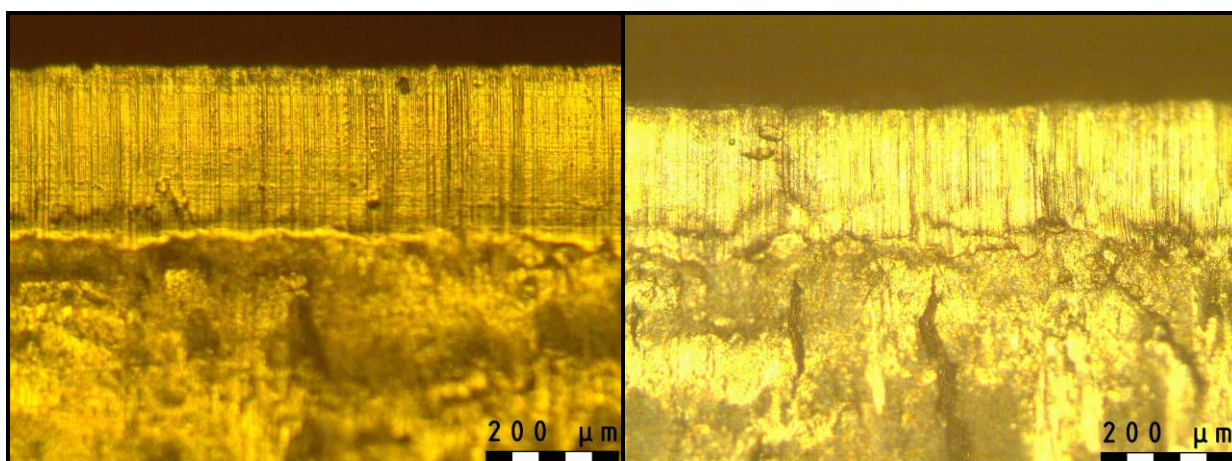
Na následujících stránkách jsou zobrazeny snímky povrchů lomové (stříhání) a obrobené (frézování, broušení a jemné broušení) plochy jednotlivých vzorků. Snímky byly vyhotoveny pomocí mikroskopu **Leica DM2500P** v laboratoři zkoušení plastů. Pro každou technologii přípravy vzorků byly zhotoveny snímky (pro zvětšení 36x a 90x) před a po deformaci příslušného vzorku.

Stříhání



Obr. 10.4. Snímky lomové hrany pro technologii stříhání – zvětšeno 36x

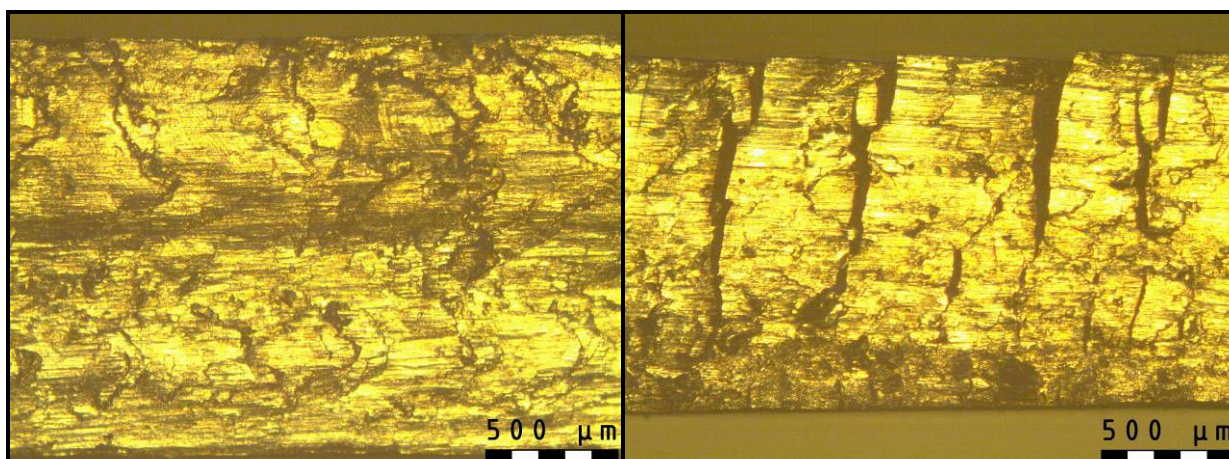
a) před deformací **B)** po deformaci



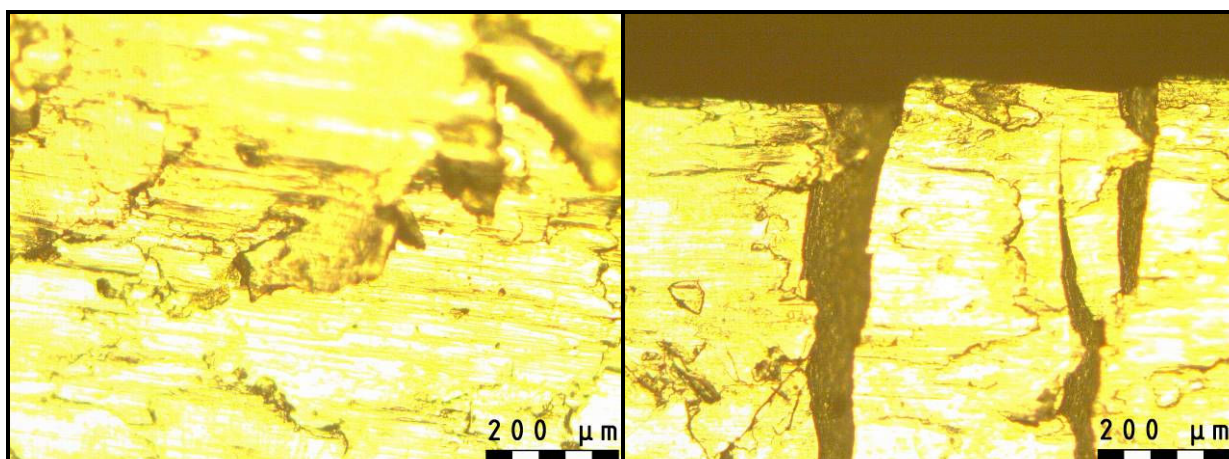
Obr. 10.5. Snímky lomové hrany pro technologii stříhání – zvětšeno 90x

a) před deformací **b)** po deformaci

Frézování

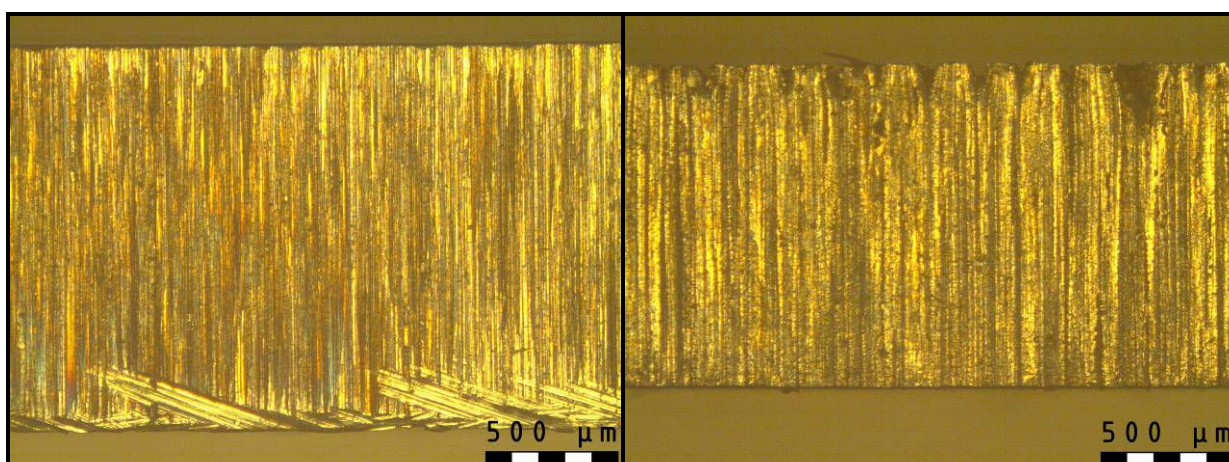


Obr. 10.6. Snímky obrobené plochy pro technologii frézování – zvětšeno 36x
a) před deformací b) po deformaci

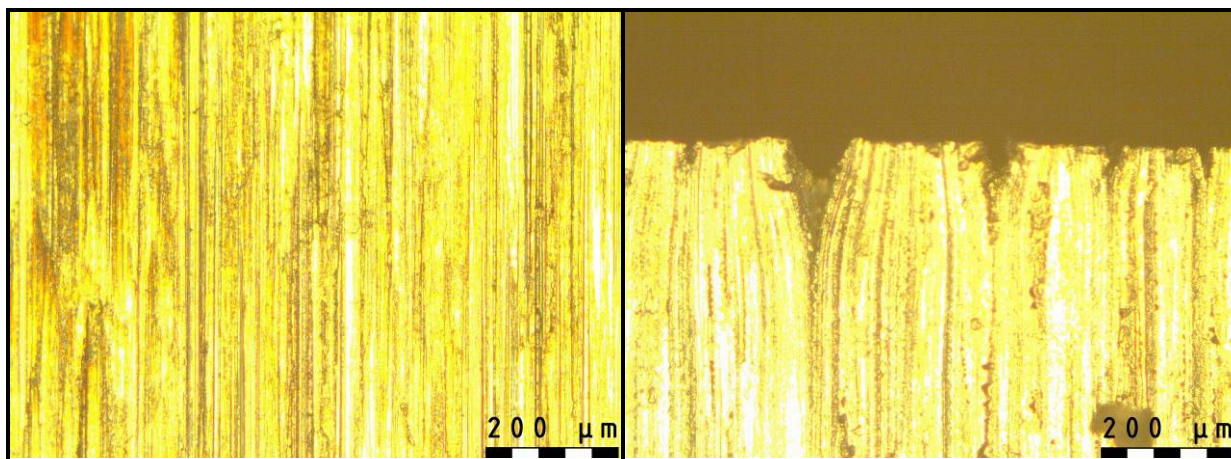


Obr. 10.7. Snímky obrobené plochy pro technologii frézování – zvětšeno 90x
a) před deformací b) po deformaci

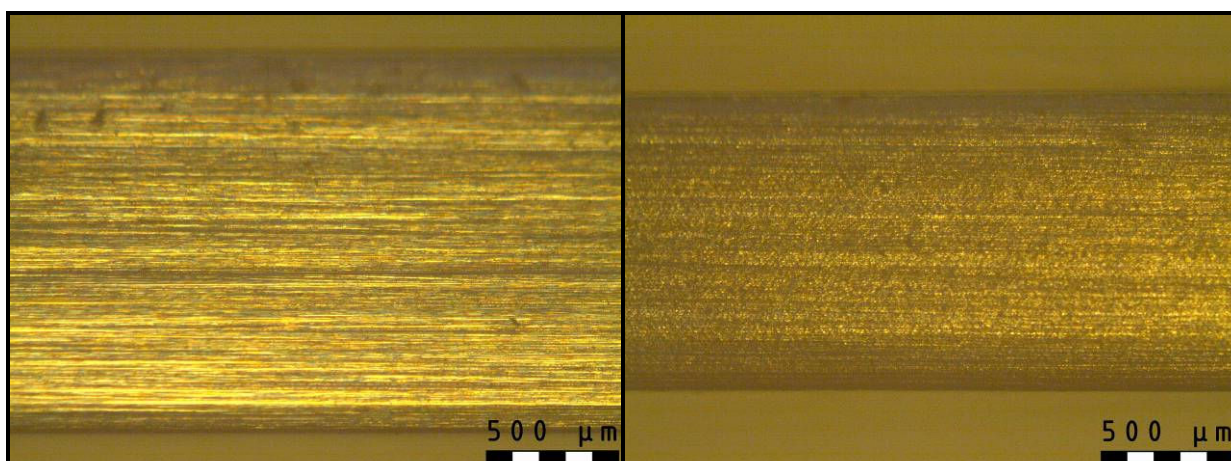
Broušení



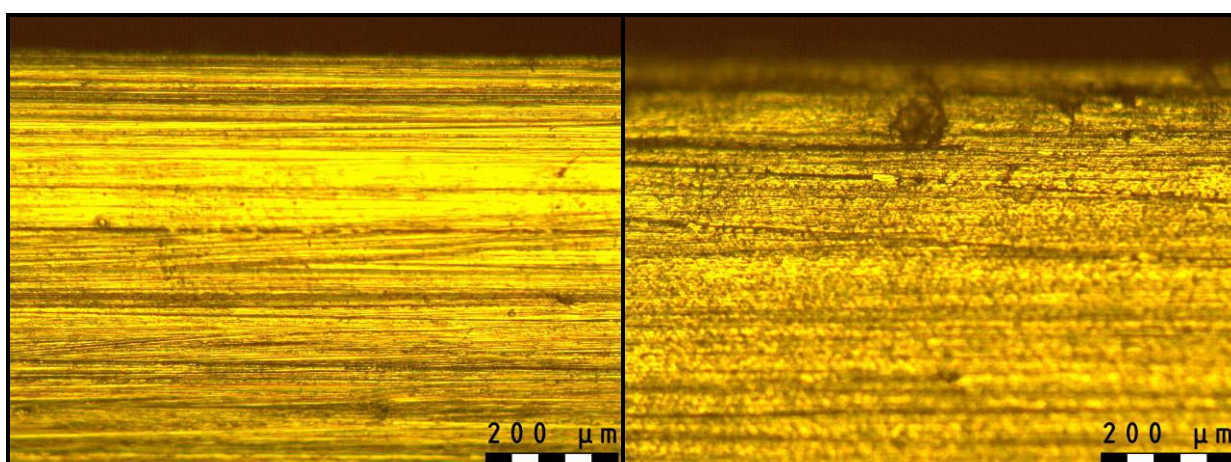
Obr. 10.8. Snímky obrobené plochy pro technologii broušení – zvětšeno 36x
a) před deformací b) po deformaci



Obr. 10.9. Snímky obrobené plochy pro technologii broušení – zvětšeno **90x**
a) před deformací **b)** po deformaci
Jemné broušení

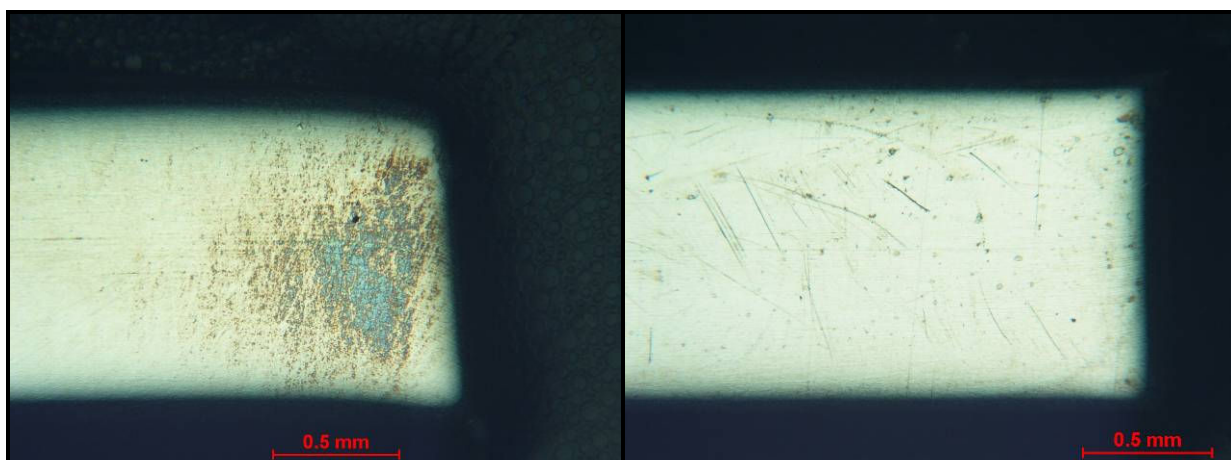


Obr. 10.10. Snímky obrobené plochy pro jemné broušení – zvětšeno **36x**
a) před deformací **b)** po deformaci

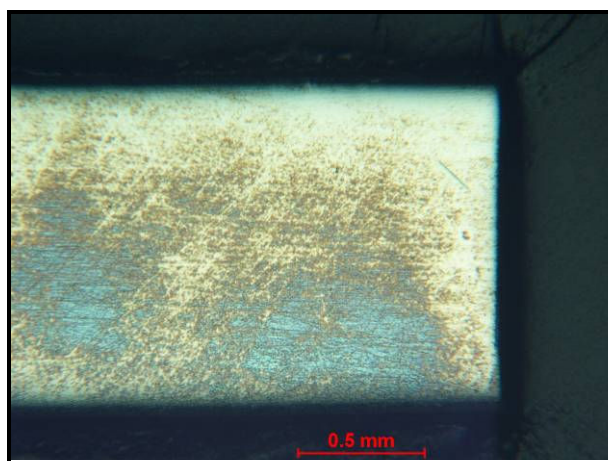


Obr. 10.11. Snímky obrobené plochy pro jemné broušení – zvětšeno **90x**
a) před deformací **b)** po deformaci

Následující snímky střížných hran byly zhotoveny na mikroskopu **NEOPHOT 21** v metalografické laboratoři Katedry strojírenské technologie.



Obr. 10.12. Snímky hrany vzorků pro vybrané technologie – zvětšeno 50x
a) stříhání b) frézování



Obr. 10.13. Snímky hrany vzorku pro technologii broušení – zvětšeno 50x

Vzorky byly připraveny běžným postupem při tvorbě metalografických výbrusů. Pro zvýraznění struktury a kvalitnější ostrost snímků byly vzorky naleptány 3% roztokem kyseliny dusičné v lihu (**Nital**). Jak je patrné z těchto snímků, leptadlo Nital téměř vůbec nenarušuje strukturu materiálu TWIP 1200 (což ovlivnilo i ostrost pořízených snímků). Ze snímků po technologii stříhání je patrná poměrně velká střížná mezera mezi střížníkem a střížnicí. Je vidět také malá oblast plastického stříhu, což je patrné již na obr. 10.4. Největší část střížné hrany je tvořena fází utržení a lze předpokládat, že právě díky této skutečnosti se v materiálu po technologii stříhání nachází velké množství mikrotrhlin. Snímky z ostatních dvou obráběcích technologií (frézování a broušení) jsou spíše informativního charakteru.

11. Diagramy mezních přetvoření

Vedle stanovení a popsání možnosti vyhodnocení mechanických hodnot materiálu TWIP 1200 bylo jako druhým hlavní cílem této práce stanovení diagramů mezních přetvoření (DMP) pro různé podmínky testování. V kapitole 4.2. jsou popsány základní teoretické poznatky ohledně DMP a také možnosti jejich experimentálního stanovení. Vzhledem k dosavadnímu vědeckovýzkumnému zaměření Katedry strojírenské technologie je v této práci k získání DMP použita metoda vypínání tvarových vzorků polokulovým tažníkem (viz kap. 4.2.2.).



Obr. 11.1. Dvojitý hydraulický lis CBA 300/63

Realizace vlastního vypínání připravených vzorků byla provedena v prostorách dílny Katedry strojírenské technologie na dvojitým hydraulickým lisu CBA 300/63 (viz obr. 11.1.), na kterém byl upevněn speciální nástroj používáný k zjišťování DMP za nižších rychlostí. Na horním beranu lisu je upevněn přidržovač příruby vzorků a spodní hydraulický píst následně realizuje vlastní vypínání tvarového vzorku za rychlosti $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4}$ m/s. V případě potřeby je možné provést vypínání testovaného vzorku také ručním posunem.

11.1. Podmínky zjišťování DMP

Stanovení vlastních podmínek měření a zjišťování DMP bylo ovlivněno především omezeným množstvím materiálu TWIP 1200, který byl k dispozici. Z tohoto důvodu nebylo možno realizovat měření za vyššího počtu deformačních rychlostí a také se nesledoval vliv smyslu deformace na výsledné oblasti použitelnosti v DMP.

K vlastnímu měření DMP pro tuto práci bylo nakonec zvoleno nejprve určení DMP za nižší rychlosti ($v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4}$ m/s) a poté zjištění DMP při vyšších rychlostech tažníku. V našem případě se konkrétně jednalo o $v_2 = 17,78$ m/s. Tato hodnota byla zvolena s ohledem na skutečnost, že se jedná o rychlost používanou při crash testech automobilů (boční náraz). Zjišťování DMP za této vyšší rychlosti tažníku probíhalo také s ohledem na předešlou historii tváření daného materiálu. Konkrétně se jednalo o předdeformování měřeného vzorku na velikost 1/3 a 2/3 mezního stavu. Mezní stav pro tyto DMP byl určen z hodnot mezního stavu pro DMP zjišťovaný bez vlivu předdeformace. V tab. 11.1. je vysvětleno názvosloví použitých vzorků.


Tab. 11.1. Označení DMP za různých podmínek měření

| Označení | Význam |
|----------|---|
| FP | Zjišťování DMP „za pomala“ ($v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4}$ m/s) |
| FR | Zjišťování DMP „za rychla“ ($v_2 = 17,78$ m/s) |
| FR 13 | Zjišťování DMP „za rychla“ ($v_2 = 17,78$ m/s) a velikosti předdeformace 1/3 mezního stavu |
| FR 23 | Zjišťování DMP „za rychla“ ($v_2 = 17,78$ m/s) a velikosti předdeformace 2/3 mezního stavu |

Pro plynulé a homogenní pokrytí všech podmínek přetvoření v DMP je nezbytné použití 13-ti různě tvarovaných vzorků. S ohledem na zaměření této práce a také na množství měřeného materiálu TWIP 1200 bylo potřeba toto číslo poněkud omezit. Pro zkoumaný materiál jsou DMP zjišťovány pouze pomocí 5-ti stop (5 stavů napjatosti), což je hodnota, která vzhledem ke zkušenostem naší katedry ještě poměrně velmi dobře dostačuje k relevantnímu zjištění DMP. Šířka vybraných vzorků

byla od 30 do 210 mm. Přehled vybraných 5-ti stop a jejich odpovídajících šířek je zobrazen v tabulce 11.2. Vzorky byly odebrány ve směru 0° na směr válcování z důvodu shody hlavního přetvoření φ_1 se směrem válcování. S ohledem na zkušenost s výsledky ze statické zkoušky tahem (viz kap. 10.) byly také tyto vzorky na požadované rozměry upraveny pomocí technologie řezání vodním paprskem a následně hrany jemně zbroušeny. Zabránilo se tak praskání vzorků vlivem mikrotrhlin, které do tohoto materiálu vnáší např. stříhání.

Tab. 11.2. Označení stop vzorků a jejich odpovídajících šířek

| DMP - FP | Stopa | | | | |
|--|---|----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Šířka [mm] | 30 | 75 | 120 | 160 | 210 |
| Tvary použitých stop, jejich šířky a označení. |  | | | | |

Na takto připravené vzorky byla posléze metodou elektrochemického leptání nanесena deformační síť. V současné době existuje značné množství postupů jak nanést na testovaný vzorek deformační síť (např. laser, offset, gumostereotypie, vyjiskřování, fotografická metoda, ...), ale vzhledem k možnostem zařízení katedry a zejména pro svoji nižší pracnost a vyhovující přesnost byla použita metoda elektrochemického leptání.

11.2. Deformační síť na povrchu plechu

Jak již bylo uvedeno v předešlé kapitole, deformační síť na měřené vzorky byla nanесena pomocí metody elektrochemického leptání. Princip této metody spočívá v nanесení deformační sítě pomocí speciální síťotiskové šablony v důsledku průchodu elektrického proudu přes elektrolyt, tuto šablonu a materiál. Výsledná deformační síť je tedy elektrochemicky vyleptána na povrch zkoušeného vzorku. Velkou výhodou takto nanесené deformační sítě je, že nedochází k jejímu setření během testování daného materiálu. Na obr. 11.2. je potom vlastní zařízení k elektrochemickému vyleptávání deformačních sítí na povrchu kovů a také vlastní deformační šablona.

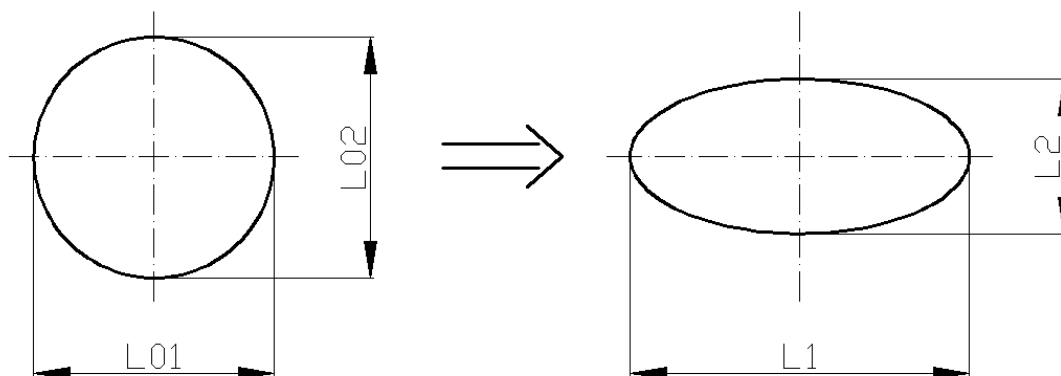


Obr. 11.2. Zařízení pro elektrochemické leptání a deformační šablona

Existuje poměrně značné množství deformačních šablon, které mají různé tvary elementů a také rozdílné velikosti těchto elementů. Pro zjišťování DMP v této práci byla použita deformační šablona s překrývajícími se kruhovými elementy s křížkem uprostřed tohoto elementu. Od výrobce (fa Erichsen) byla udána jako velikost (průměr) deformačního elementu hodnota 2 mm. Je však zřejmé, že pro každý měřený materiál je nejprve nutné provést změření nanесených elementů ještě nedeformované sítě, abychom určili přesnou velikost $L_{01,2}$ pro testovaný materiál. Tento počáteční rozměr nedeformovaného elementu byl určen pomocí dílenského mikroskopu připojeného k PC jako aritmetický průměr z proměření 30-ti stochasticky vybraných elementů na povrchu testovaného materiálu TWIP 1200. Bylo změřeno, že $L_{01} = 1,994 \pm 0,006$ a $L_{02} = 2,003 \pm 0,004$. Vzorky s nanесenou nedeformovanou sítí jsou na obr. 11.4.

Tyto původně kruhové elementy se posléze během procesu vypínání polokulovým tažníkem přetvoří na elipsy, kde je sledována velikost hlavní (L_1) a vedlejší osy (L_2) - viz obr. 11.3.

Po provedení samotného procesu vypínání až do vzniku trhliny je potom na vzorku vybráno několik elementů, které splňují námi přijatou definici mezního stavu.



Obr. 11.3. Hlavní rozměry počáteční a přetvořené sítě

V této práci bylo pro každou stopu měřeno 5 vzorků, na kterých byly vždy jako měřené elementy (splňující definovaný mezní stav) vybrány 2-3 elipsy. Pro každou stopu je tedy potom použito do DMP 10-15 bodů. Na takto vybraných elementech se posléze pomocí dílenského mikroskopu připojeného k PC stanovily rozměry L_1 a L_2 . Pro vlastní konstrukci DMP byly potom tyto hodnoty přepočítány pomocí rovnice (87) na hlavní a vedlejší normálná mezní přetvoření.

$$\varphi_{1k,2k} = \ln \frac{L_{1,2}}{L_{01,2}} \quad (87)$$

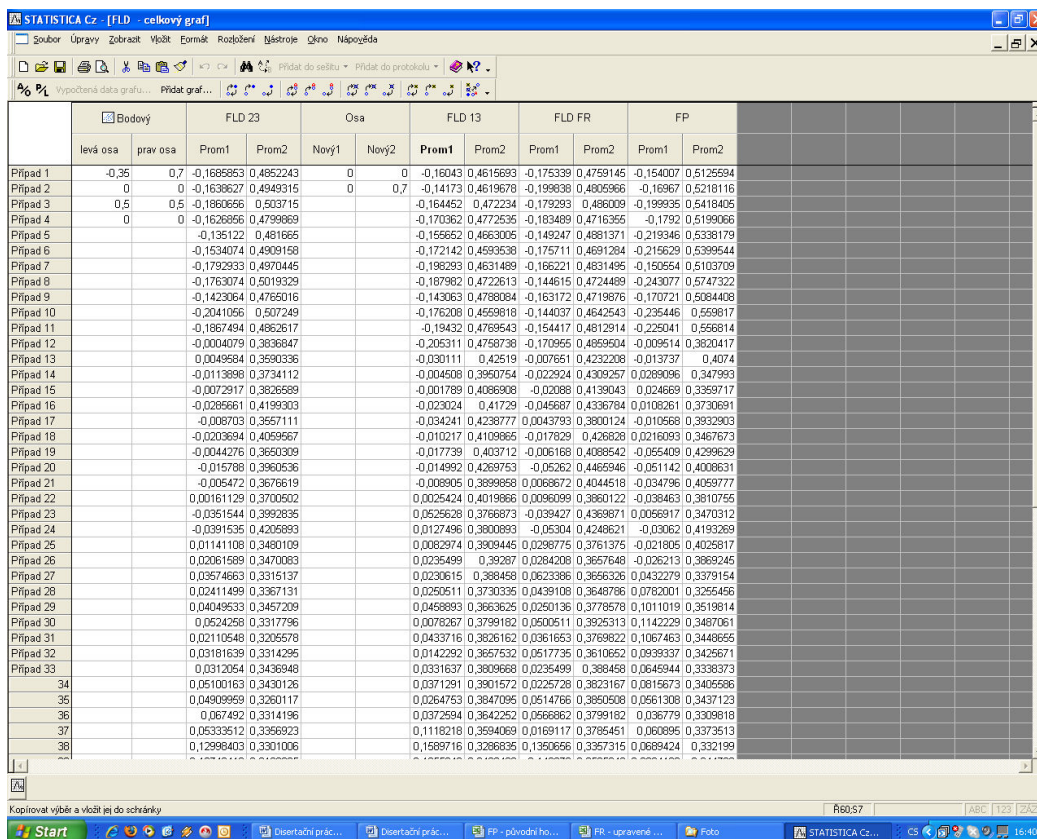


Obr. 11.4. Vzorky s nanesenou nedeformovanou sítí

11.3. Zpracování naměřených hodnot

Pomocí výběru a změření elementů, které splňují naše předpoklady ohledně dosažení mezního stavu, se určí souřadnice bodů $[\varphi_{2kj}, \varphi_{1kj}]$, kde $j = 1 \dots N$ je počet bodů v pásmu. Takto vynesené hodnoty kritických mezních přetvoření φ_{2k} , φ_{1k} potom vytvoří samotný DMP. V našem případě vytvořily vždy body pro určitou stopu (1-5) jisté seskupení, které potom s ohledem na další změřené stopy určilo hranice použitelnosti materiálu TWIP 1200.

Všechny takto naměřené body jsou však zatíženy určitou chybou. Jejím vlivem posléze naměřené hodnoty mohou do jisté míry v grafu kolísat. Jedná se především o vliv nerovnoměrného rozložení vlastností použitého materiálu, stanovení mezního stavu a výběru vhodných elementů a přesnosti měřících zařízení – v našem případě dílenského mikroskopu. Lze však předpokládat, že povrchové a vnitřní defekty, které mají vliv na daný mezní stav, jsou v materiálu rozloženy stochasticky a tedy i mezní přetvoření, charakterizované v grafu pomocí bodů o souřadnicích $[\varphi_{2k}, \varphi_{1k}]$, lze popsat pomocí metod matematické statistiky. V této práci byl použit program **STATISTICA CZ v.6**. Na obr. 11.5. je vidět pracovní prostředí tohoto programu.



| | Bodový | | FLD 23 | | Osa | | FLD 13 | | FLD FR | | FP | |
|-----------|----------|-----------|------------|-----------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | levá osa | pravá osa | Prom1 | Prom2 | Nový1 | Nový2 | Prom1 | Prom2 | Prom1 | Prom2 | Prom1 | Prom2 |
| Případ 1 | -0,35 | 0,7 | -0,1685953 | 0,4852243 | 0 | 0 | -0,16043 | 0,4615693 | -0,175339 | 0,4759145 | -0,154007 | 0,5125594 |
| Případ 2 | 0 | 0 | -0,1636627 | 0,4949315 | 0 | 0,7 | -0,14173 | 0,4619678 | -0,199338 | 0,4805966 | -0,16967 | 0,5218116 |
| Případ 3 | 0,5 | 0,5 | -0,1860656 | 0,503715 | | | -0,164452 | 0,472234 | -0,179293 | 0,486009 | -0,199935 | 0,5418405 |
| Případ 4 | 0 | 0 | -0,1626866 | 0,4799869 | | | -0,170362 | 0,472235 | -0,183489 | 0,4716355 | -0,1792 | 0,5199066 |
| Případ 5 | | | -0,135122 | 0,481665 | | | -0,156652 | 0,4663005 | -0,149247 | 0,4881371 | -0,219346 | 0,5338179 |
| Případ 6 | | | -0,1534074 | 0,4909158 | | | -0,172142 | 0,4593538 | -0,175711 | 0,4691284 | -0,215629 | 0,5399544 |
| Případ 7 | | | -0,1792933 | 0,4970445 | | | -0,198293 | 0,4631489 | -0,166221 | 0,4831495 | -0,150554 | 0,5103709 |
| Případ 8 | | | -0,1763074 | 0,5019329 | | | -0,187982 | 0,4722613 | -0,144615 | 0,4724489 | -0,243077 | 0,5747322 |
| Případ 9 | | | -0,1423064 | 0,4765016 | | | -0,143063 | 0,4788084 | -0,163172 | 0,4719878 | -0,170721 | 0,5084408 |
| Případ 10 | | | -0,2041056 | 0,507249 | | | -0,176208 | 0,4559818 | -0,144037 | 0,4642543 | -0,235446 | 0,5569817 |
| Případ 11 | | | -0,1887494 | 0,4862617 | | | -0,19432 | 0,4769543 | -0,154417 | 0,4812914 | -0,225041 | 0,5568814 |
| Případ 12 | | | -0,0004079 | 0,3836847 | | | -0,205311 | 0,4758738 | -0,170955 | 0,4869504 | -0,009514 | 0,3820417 |
| Případ 13 | | | 0,0049584 | 0,3590336 | | | -0,030111 | 0,42519 | -0,007651 | 0,4232208 | -0,013737 | 0,4074 |
| Případ 14 | | | -0,0113898 | 0,3734112 | | | -0,004508 | 0,3950754 | -0,022924 | 0,4309257 | 0,0289096 | 0,347993 |
| Případ 15 | | | -0,0072917 | 0,3826589 | | | -0,001789 | 0,4086908 | -0,02088 | 0,4139043 | 0,024669 | 0,3369717 |
| Případ 16 | | | -0,0286661 | 0,4199303 | | | -0,023024 | 0,41729 | -0,045687 | 0,4336784 | 0,0108261 | 0,3730691 |
| Případ 17 | | | -0,008703 | 0,3557111 | | | -0,034241 | 0,4238777 | 0,0043793 | 0,3800124 | -0,010568 | 0,3932903 |
| Případ 18 | | | -0,0203694 | 0,4059567 | | | -0,010217 | 0,4109865 | -0,017829 | 0,426828 | 0,0216093 | 0,3467673 |
| Případ 19 | | | -0,0044276 | 0,3650309 | | | -0,017739 | 0,403712 | -0,006168 | 0,4088542 | -0,055409 | 0,4299629 |
| Případ 20 | | | -0,015788 | 0,3960536 | | | -0,014952 | 0,4269753 | -0,05262 | 0,4465946 | -0,051142 | 0,4008631 |
| Případ 21 | | | -0,005472 | 0,3676619 | | | -0,008905 | 0,3899688 | 0,0068672 | 0,4044518 | -0,034796 | 0,4059777 |
| Případ 22 | | | 0,00161129 | 0,3700502 | | | 0,0025424 | 0,4019666 | 0,0096099 | 0,3660122 | -0,038463 | 0,3810755 |
| Případ 23 | | | 0,0351544 | 0,3992835 | | | 0,0525628 | 0,3766873 | -0,039427 | 0,4369871 | 0,0056917 | 0,3470312 |
| Případ 24 | | | -0,0391635 | 0,4205693 | | | 0,0127496 | 0,3800893 | -0,05304 | 0,4248621 | -0,00862 | 0,4193269 |
| Případ 25 | | | 0,01141108 | 0,3480109 | | | 0,0062974 | 0,3909446 | 0,0298775 | 0,3761375 | -0,021805 | 0,4025817 |
| Případ 26 | | | 0,0061699 | 0,3470083 | | | 0,0235499 | 0,39287 | 0,0284208 | 0,3657648 | -0,026213 | 0,3869245 |
| Případ 27 | | | 0,03574663 | 0,3315137 | | | 0,0230615 | 0,388458 | 0,0623386 | 0,3656336 | 0,0432279 | 0,3739154 |
| Případ 28 | | | 0,02411499 | 0,3367131 | | | 0,0250511 | 0,3730335 | 0,0439108 | 0,3648786 | 0,0782001 | 0,3255456 |
| Případ 29 | | | 0,04049533 | 0,3457209 | | | 0,0458893 | 0,3663625 | 0,0250136 | 0,3779578 | 0,1011019 | 0,3519814 |
| Případ 30 | | | 0,0624258 | 0,3317796 | | | 0,0078267 | 0,3799182 | 0,0500511 | 0,3925313 | 0,1142229 | 0,3487061 |
| Případ 31 | | | 0,02110548 | 0,3205578 | | | 0,0433716 | 0,3826162 | 0,0361653 | 0,3769822 | 0,1067463 | 0,3448655 |
| Případ 32 | | | 0,03181639 | 0,3314295 | | | 0,0142292 | 0,3657532 | 0,0517736 | 0,3610652 | 0,0939337 | 0,3425671 |
| Případ 33 | | | 0,0312054 | 0,3436948 | | | 0,0331637 | 0,3809668 | 0,0235499 | 0,388458 | 0,0645944 | 0,3338373 |
| 34 | | | 0,05100163 | 0,3430126 | | | 0,0371291 | 0,3901572 | 0,0225728 | 0,3823167 | 0,0815673 | 0,3405686 |
| 35 | | | 0,04909959 | 0,3260117 | | | 0,0264753 | 0,3847095 | 0,0514766 | 0,3850508 | 0,0561308 | 0,3437123 |
| 36 | | | 0,067492 | 0,3314196 | | | 0,0372594 | 0,3642252 | 0,0568862 | 0,3799182 | 0,036779 | 0,3309818 |
| 37 | | | 0,0533512 | 0,3356923 | | | 0,1118219 | 0,3594069 | 0,0169117 | 0,3785451 | 0,060895 | 0,3373513 |
| 38 | | | 0,1298403 | 0,3301006 | | | 0,1589716 | 0,3286835 | 0,1350656 | 0,3357315 | 0,0689424 | 0,3321198 |

Obr. 11.5. Pracovní prostředí programu **STATISTICA CZ v.6**

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, pro získání DMP bylo použito 5-ti deformačních stop. K zachycení a pokrytí celého intervalu intenzity přetvoření m_ϕ a posléze k vyhodnocení samotného DMP lze s výhodou použít metodu regresní analýzy. Pro naměřené hodnoty mezních přetvoření ϕ_{2k} a ϕ_{1k} se potom touto metodou naleznou i hodnoty regresních parametrů ($\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$) vybrané funkce. Jedná se vlastně o využití metody nejmenších čtverců pro nalezení dané křivky. Pro naměřené hodnoty mezních přetvoření lze tedy regresní analýzou nalézt a proložit vhodnou regresní křivku, která představuje křivku mezních přetvoření. Ukazuje se, že je vhodné pro obě větve DMP volit polynomickou křivku druhého řádu o rovnici:

$$\phi_{1k} = \mathbf{A} + \mathbf{B} \cdot \phi_{2k} + \mathbf{C} \phi_{2k}^2 \quad (88)$$

kde: $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ jsou příslušné regresní koeficienty polynomické křivky.

K posouzení rozptylu hodnot ϕ_{1k} kolem regresní křivky se využívá reziduální směrodatné odchylky s_R . Při určování KMP je tato výběrová charakteristika náhodnou veličinou a její odhad (resp. odhad vektoru regresních koeficientů $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$) je zatížen příslušnou chybou. Přesnost, s jakou tento odhad odhaduje parametr základního souboru, popisuje **konfidenční interval**. V případě KMP ve tvaru polynomu druhého řádu dle (88) lze střední hodnotu mezní deformace ϕ_{1kj} očekávat na hladině významnosti α v rozmezí:

$$\phi_{1kj} \pm t_\alpha(n-p)s_R \cdot \sqrt{S} \quad (89)$$

kde: $S = \mathbf{f}_j(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{f}_j^T$

$t_\alpha(n-p)$ je kritická hodnota Studentova rozdělení o stupni volnosti $(n-p)$,

s_R je reziduální směrodatná odchylka,

\mathbf{f}_j je vektor rovný j -tému řádu matice \mathbf{X} , která obsahuje funkce nezávisle proměnné ϕ_{2k} .

Vedle konfidenčního intervalu lze stanovit i oboustranné toleranční meze (**toleranční pásmo – toleranční interval**) dle vztahu:

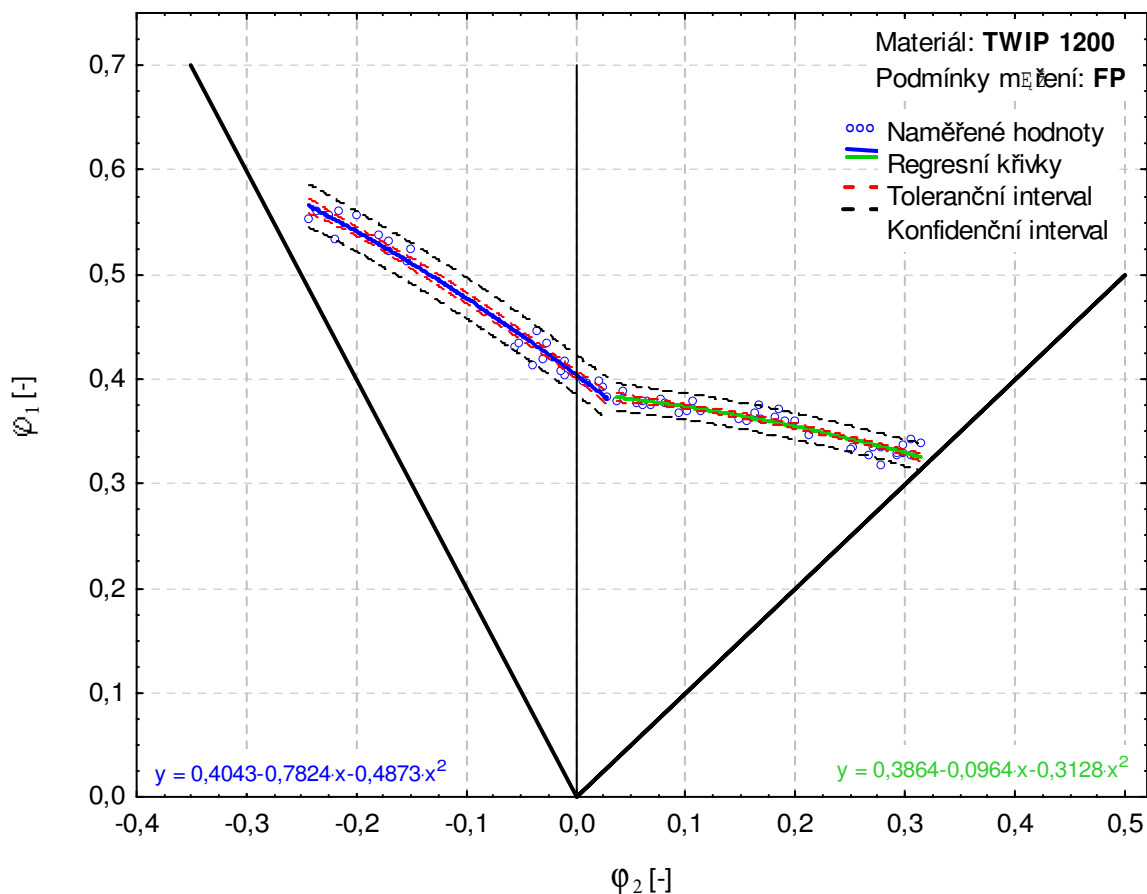
$$\phi_{1kj} \pm k_1 s_R \quad (90)$$

kde k_1 je tabelováno v [41] v závislosti na N (počet měření) a P (podíl bodů základního souboru zahrnutého do tolerančních mezí s pravděpodobností γ).

Hladina významnosti pro zhotovení konfidenčního intervalu byla volena $\alpha = 5\%$. Pro zhotovení tolerančního intervalu byly voleny parametry $P = 95\%$ a $\gamma = 95\%$.

11.4. DMP při rychlosti tažníku $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4}$ m/s

Postupem popsáním v předešlé kapitole byl stanoven DMP pro rychlost tažníku $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4}$ m/s (dále označovaný pouze jako **FP**). Výsledný DMP je na obr. 11.6.



Obr. 11.6. DMP při rychlosti tažníku $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4}$ m/s (**FP**)

Tab. 11.3. Regresní koeficienty DMP při rychlosti tažníku $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4}$ m/s

| DMP - FP | Levá větev DMP | | | Pravá větev DMP | | |
|----------------------|----------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|
| Regresní koeficienty | A | B | C | A | B | C |
| | 0,4043 | -0,7824 | -0,4873 | 0,3864 | -0,0964 | -0,3128 |

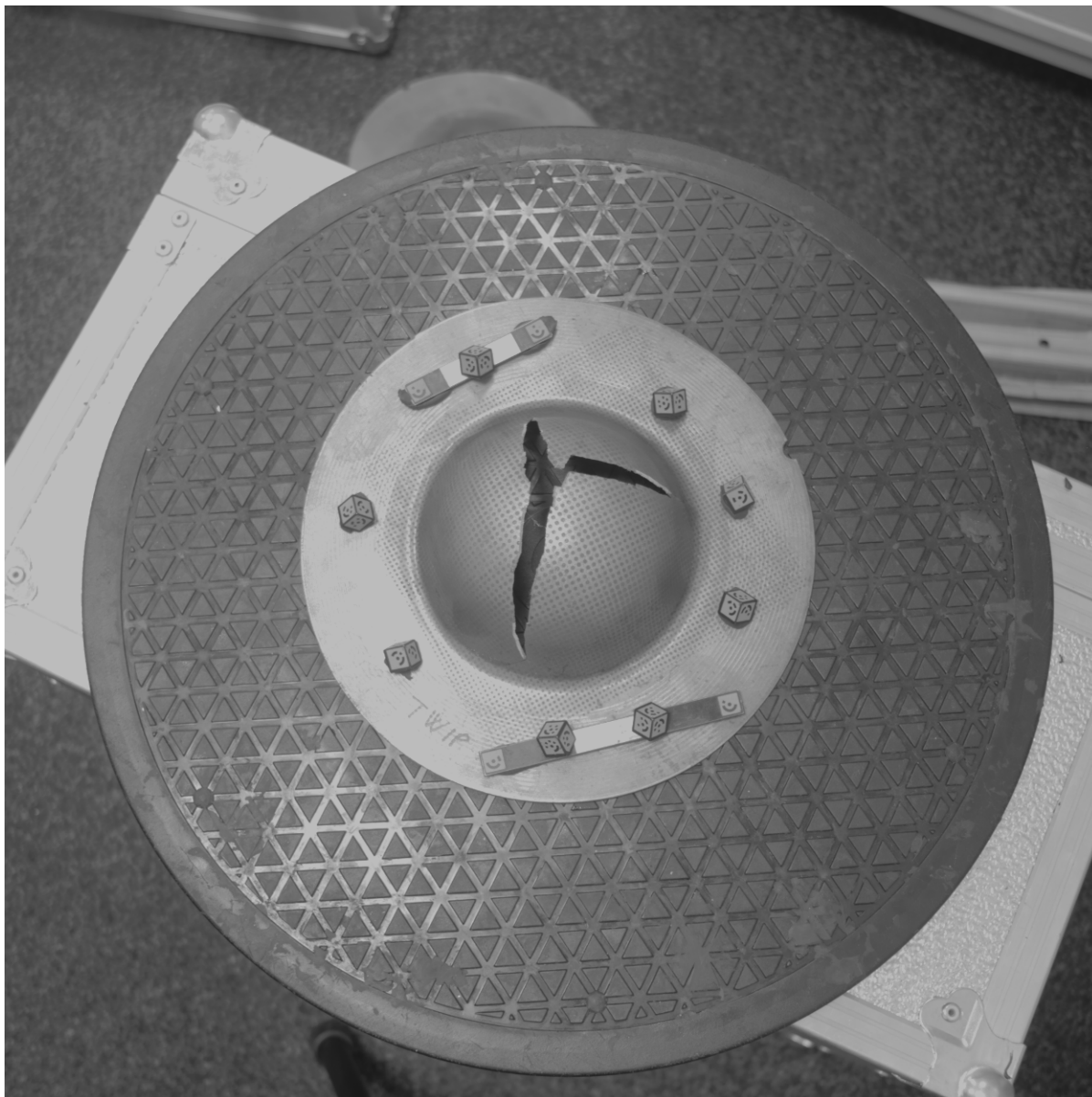
11.4.1. Rozložení deformace podél vzorku

Jedním z důležitých aspektů měření vysokopevnostních materiálů je volba samotného mezního stavu a následný výběr deformovaných elementů odpovídající tomuto meznímu stavu. Pro samotné sestavení se ukazuje jako nejvýhodnější vybírat elementy, které leží v těsné blízkosti trhliny a jsou také zasaženy lokálním ztenčením. Takováto definice mezního stavu a z ní plynoucí výběr deformovaných elementů byl použit i v této práci.

Z publikovaných prací [27] ohledně zjišťování DMP pro vysokopevnostní materiály je patrný velký důraz na zcela jiné rozložení deformace podél testovaného vzorku než je charakteristický pro hlubokotažné materiály. Uvádí se, že vysokopevnostní materiály mají mnohem vyšší gradient hlavního přetvoření φ_1 než materiály hlubokotažné. Toto může v důsledku vést ke značnému posunutí KMP ve směru osy φ_1 , jelikož vybrané elementy jsou zasaženy lokálním ztenčením a tedy více deformované než elementy dále od trhliny. Pro spolehlivé nalezení KMP je nezbytné brát tento gradient v úvahu a např. snížit KMP o určitou toleranční hodnotu nebo vybírat elementy, které jsou lokálním ztenčením zasaženy pouze do určité míry.

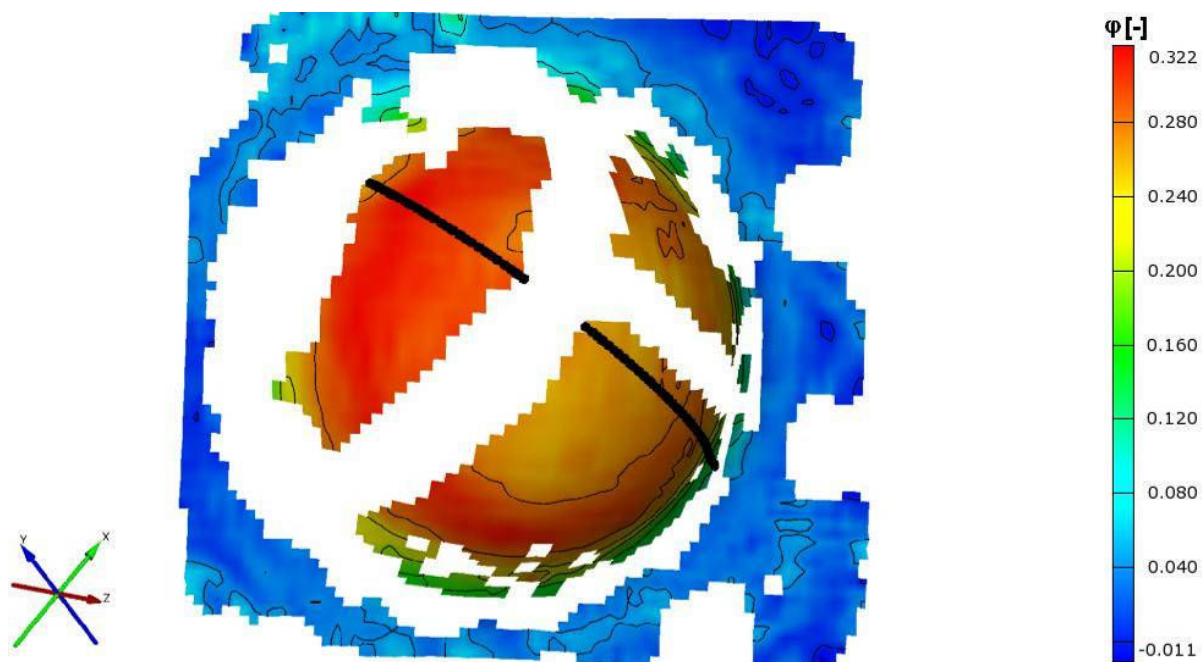
Bylo tedy i v této práci snahou nalézt rozložení deformace podél vzorku pro materiál TWIP 1200, který patří do skupiny vysokopevnostních materiálů a potvrdit tedy předpoklad velkého gradientu hlavní deformace v okolí trhliny. Jako porovnávací materiál byl vybrán další zástupce vysokopevnostních materiálů – **Docol 1200M**. Jedná se o materiál zhruba obdobných pevnostních charakteristik ($R_{p0,2} \approx 1100 \text{ MPa}$, $R_m \approx 1250 \text{ MPa}$) jako materiál TWIP 1200, ale o mnohem nižší celkové tažnosti ($A_{50mm} \approx 6,5\%$). Tyto jeho materiálové vlastnosti předurčují tento materiál jako poměrně velmi charakteristického zástupce vysokopevnostních materiálů.

Vlastní sledování rozložení přetvoření na vzorcích obou testovaných materiálů (TWIP 1200 a Docol 1200M) proběhlo ve firmě Škoda Auto a.s. pomocí programu **ARGUS – v6.1.0-5**. Jedná se o zařízení, které snímkováním měřeného objektu vyhodnocuje rozložení deformace [42]. Na materiál je nejprve potřeba nanést deformační síť v podobě bodů, které jsou od sebe pravidelně vzdáleny (v našem případě byla vzdálenost jednotlivých bodů 2 mm), poté proběhne vlastní deformace a nakonec systém z posunu těchto bodů vyhodnotí rozložení deformace. Na obr. 11.7. je vidět deformovaný vzorek připravený ke kalibraci a k vlastnímu snímkování.

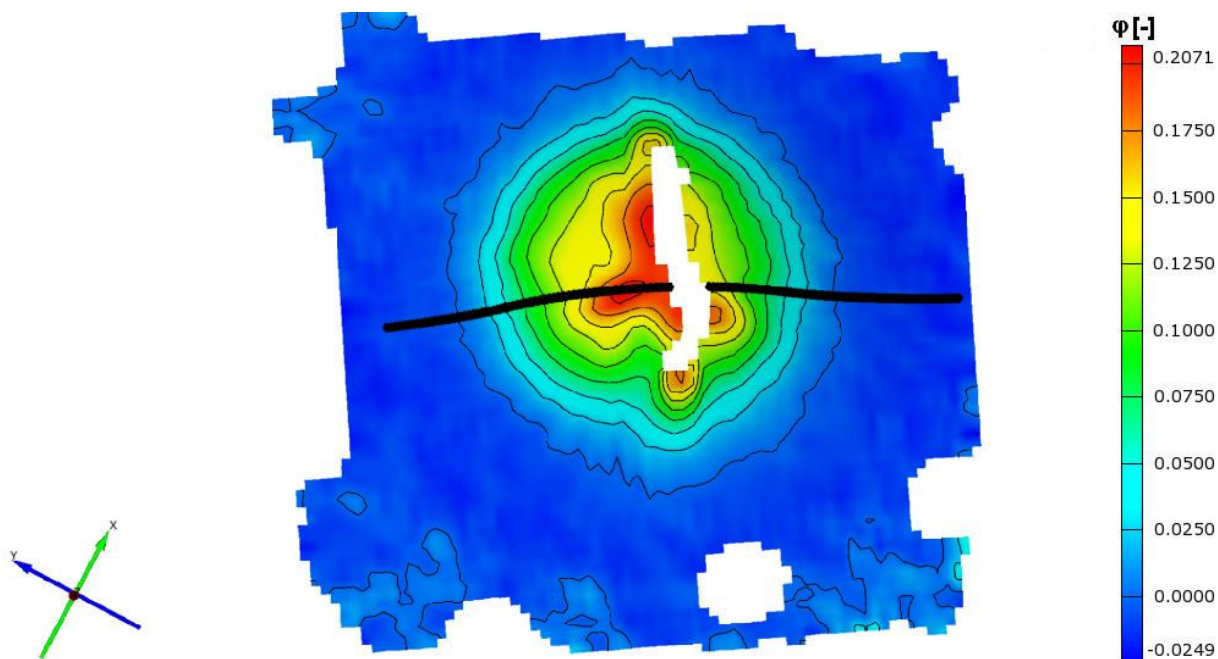


Obr. 11.7. Deformovaný vzorek pro snímkování programem **ARGUS – v6.1.0-5**

Na obr. 11.7. jsou vidět také kalibrační kameny nezbytné pro první krok optického snímkování testovaného materiálu. Pomocí těchto kamenů si daný program určuje vlastní kalibrační prostor a také přesné posunutí měřených bodů. Po provedení kalibrace následovalo vlastní snímkování pomocí optického zařízení a vyhodnocení naměřených dat. Na obr. 11.8. a 11.9. je vidět rozložení přetvoření na měřeném vrchlíku pomocí logaritmického přetvoření pro oba testované materiály. Je patrný poměrně značný rozdíl v chování obou materiálů, které jsou obecně řazeny do stejné skupiny vysokopevnostních materiálů, ale z hlediska maximálního přetvoření (tažnosti) se velice liší nejenom velikostně, ale i samotným rozložením.



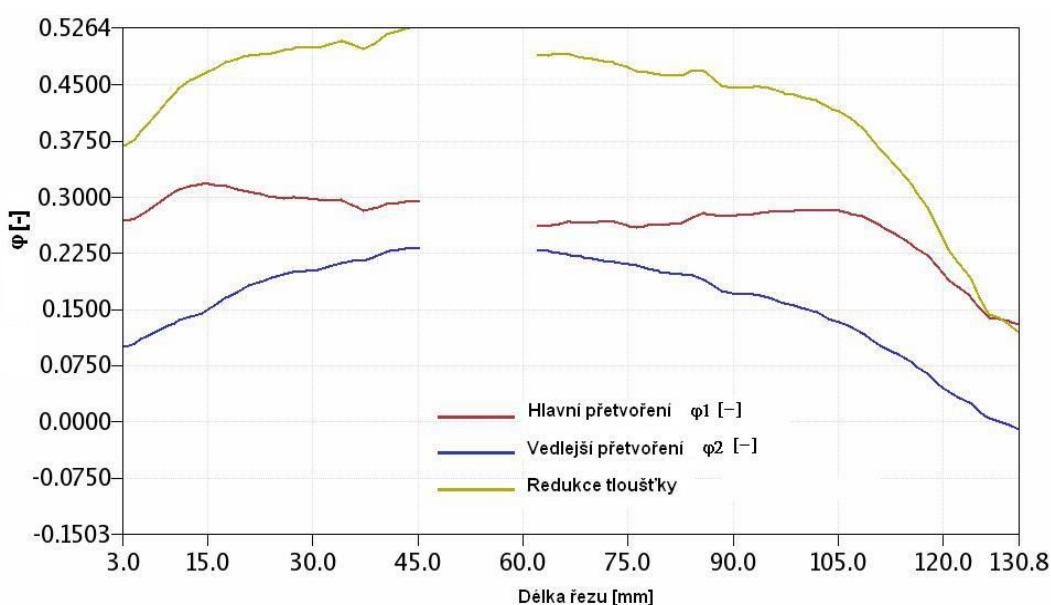
Obr. 11.8. Rozložení hlavního přetvoření ϕ_1 pro materiál **TWIP 1200**



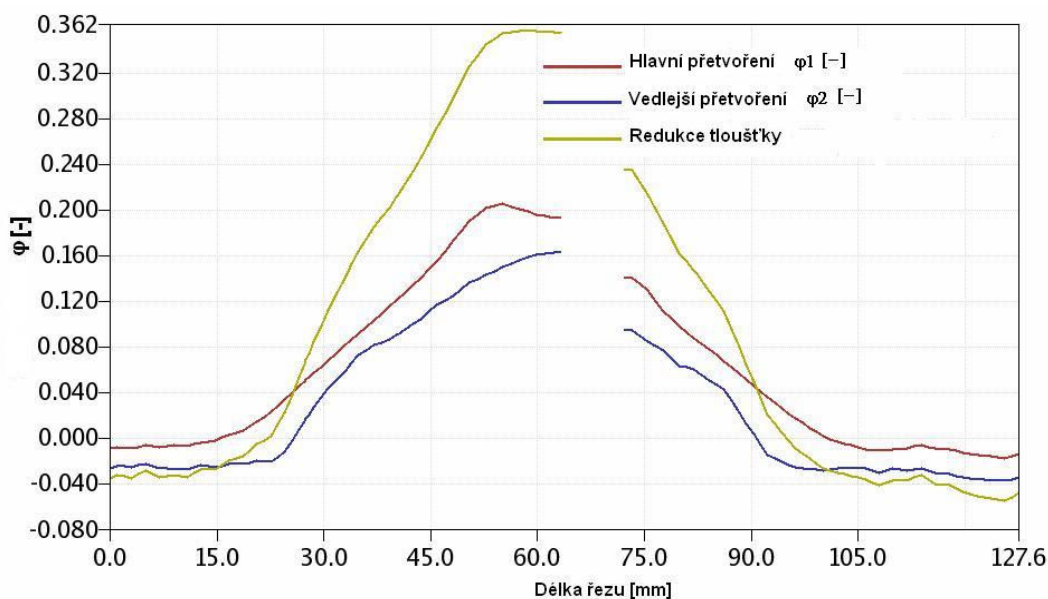
Obr. 11.9. Rozložení hlavního přetvoření ϕ_1 pro materiál **Docol 1200M**

Z výše uvedených obrázků vyplývají dvě podstatné skutečnosti, které do určité míry již naznačily výsledky ze statické zkoušky tahem. Jedná se o značnou hodnotu maximálního přetvoření, které dosahuje materiál TWIP 1200, ale hlavně o rozložení tohoto přetvoření, které je téměř homogenní po celém vrchlíku. Tato skutečnost již byla v tahové zkoušce naznačena praktickou shodou homogenní tažnosti A_g s A_{50mm} .

I přes tuto skutečnost lze odlišnou volbou definice mezního stavu, ale hlavně výběrem deformovaných elementů v oblasti lokálního ztenčení pro porovnávání materiál Docol 1200M, dosáhnou v pravé větvi DMP téměř stejných hodnot KMP. Při prvním pohledu na takovýto DMP bez jiných podkladů a informací (výsledků ze statické zkoušky tahem, fotografií vytažených vzorků,...) se potom oba tyto materiály mohou jevit jako obdobné. Je tedy nezbytné znát rozložení deformace testovaného materiálu po ploše vrchlíku. Z tohoto důvodu byl sestrojen řez v obou testovaných materiálech a změřeno rozložení hlavního přetvoření podél tohoto řezu. Na obr. 11.8. a 11.9. je tento řez naznačen černou čarou.



Obr. 11.10 Rozložení přetvoření ve směru řezu pro materiál **TWIP 1200**



Obr. 11.11. Rozložení přetvoření ve směru řezu pro materiál **Docol 1200M**

Z rozložení deformace podél čáry řezu je patrné, že materiál TWIP 1200 neodpovídá dosud popisovanému chování typickému pro vysokopevnostní materiály. Ukazuje se, že toto rozložení je téměř homogenní po celé délce měřeného vrchlíku. Tato skutečnost potvrzuje předpoklad protváření v celém objemu v případě materiálu TWIP 1200, což umožňuje tomuto materiálu dosáhnout velkého přetvoření ($\varphi > 0,5$) i za vyšších napětí ($\sigma > 1000$ MPa). Nedochozí zde k výrazné lokalizaci napětí, jak bylo patrné již u vzorků pro statickou zkoušku tahem. Zde se téměř nelokalizovala deformace, materiál se tvářel v celém objemu a následně praskl.

Naopak výsledky pro materiál Docol 1200M zcela odpovídají charakteristickému chování vysokopevnostních materiálů, kde se jedná o značný gradient přetvoření v okolí trhliny. V případě deformace takového materiálu se sice dosáhne velkých napětí ($\sigma > 1000$ MPa), ale již při malém přetvoření ($\varphi \approx 0,1$) dojde k lokalizaci deformace do poměrně úzké části materiálu a následnému prasknutí měřeného vzorku.

Jak již bylo zmíněno, z hlediska dosažené maximální deformace lze potom naměřit na obou materiálech pro pravou větev KMP téměř podobných hodnot. Výsledky této práce ukazují, že pro případ materiálu TWIP 1200 a jeho porovnání s ostatními vysokopevnostními materiály by bylo vhodné snažit se zohlednit jeho deformační chování a tedy srovnat průběh rozložení přetvoření pro různé materiály. Jednou z možností je např. vypočítat **plochu pod křivkou** rozložení přetvoření pro předem daný interval délky řezu pomocí Newton-Leibnizovy věty, kde pro případ známé integrovatelné funkce f v $\langle a; b \rangle$ a primitivní funkce F k f v $\langle a; b \rangle$ platí [43]:

$$\int_a^b f(x)dx = F(x) \Big|_a^b = F(b) - F(a) \quad (91)$$

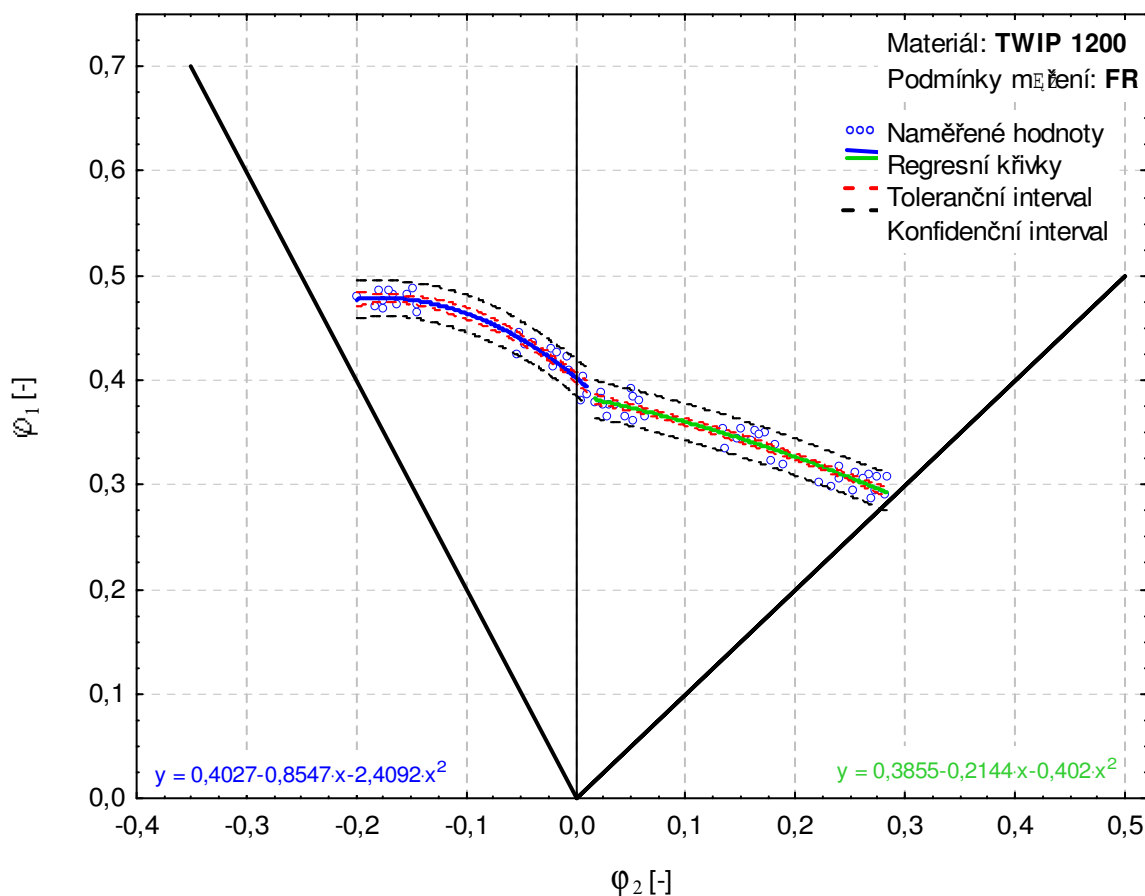
V tomto případě by stačilo aproximovat známá data z průběhu rozložení přetvoření. Jako nejvhodnější se jeví aproximovat polynomem n -tého stupně, kde:

$$\int_a^b (x^n + x^{n-1})dx = \frac{1}{n+1} x^{n+1} \Big|_a^b + \frac{1}{n} x^n \Big|_a^b \quad (92)$$

Jako meze pro výpočet plochy pod křivkou pro tento případ zjišťování DMP vypínání polokulovým tažníkem je vhodné brát průměr použitého tažníku. Zde by se tedy jednalo o 100 mm ($a = 0$; $b = 100$). Z takto spočítaných velikostí ploch pod křivkou a jejich porovnání lze určit, který materiál je vhodnější pro vyšší přetvoření, když v DMP dosahují materiály v pravé větvi KMP obdobných hodnot.

11.5. DMP při rychlosti tažníku $v_2 = 17,78 \text{ m/s}$

Postupem popsáním v kap. 4.3. a předešlých kapitolách byl stanoven DMP pro rychlost tažníku $v_2 = 17,78 \text{ m/s}$ (dále označovaný pouze jako **FR**). Výsledný DMP je vidět na obr. 11.12.



Obr. 11.12. DMP při rychlosti tažníku $v_2 = 17,78 \text{ m/s}$ (**FR**)

Tab. 11.4. Regresní koeficienty DMP při rychlosti tažníku $v_2 = 17,78 \text{ m/s}$

| DMP - FP | Levá větev DMP | | | Pravá větev DMP | | |
|----------------------|----------------|---------|---------|-----------------|---------|--------|
| Regresní koeficienty | A | B | C | A | B | C |
| | 0,4027 | -0,8547 | -2,4092 | 0,3855 | -0,2144 | -0,402 |

11.6. DMP při rychlosti tažníku $v_2 = 17,78 \text{ m/s}$ a předdeformaci $1/3$

Při zjišťování DMP za vyšší rychlosti tažníku a provedení předdeformace materiálu bylo nejdříve nutné stanovit velikost této předdeformace. Vzhledem ke zkušenostem Katedry strojírenské technologie byly vybrány dvě velikosti této předdeformace a to konkrétně $1/3$ a $2/3$ z maximální dosažené hloubky vrchlíku (tedy mezního stavu pro materiál TWIP 1200) naměřené při sestrojování DMP pro podmínky označené jako FP. Velikosti hloubky předdeformace pro všechny měřené stopy jsou zaznamenány v tab. 11.5. Hodnoty jsou sníženy díky zaokrouhlování a také kvůli bezpečnosti. Na obr. 11.13. jsou vzorky předdeformované na $2/3$.

Tab. 11.5. Velikosti předdeformace pro jednotlivé stopy

| Stopa | Zdvih – mezní stav [mm] | Předdeformace | |
|-------|-------------------------|---------------|------------|
| | | $1/3$ [mm] | $2/3$ [mm] |
| 1 | 50 | 17 | 34 |
| 2 | 47 | 16 | 32 |
| 3 | 42 | 14 | 28 |
| 4 | 39 | 13 | 26 |
| 5 | 33 | 11 | 22 |

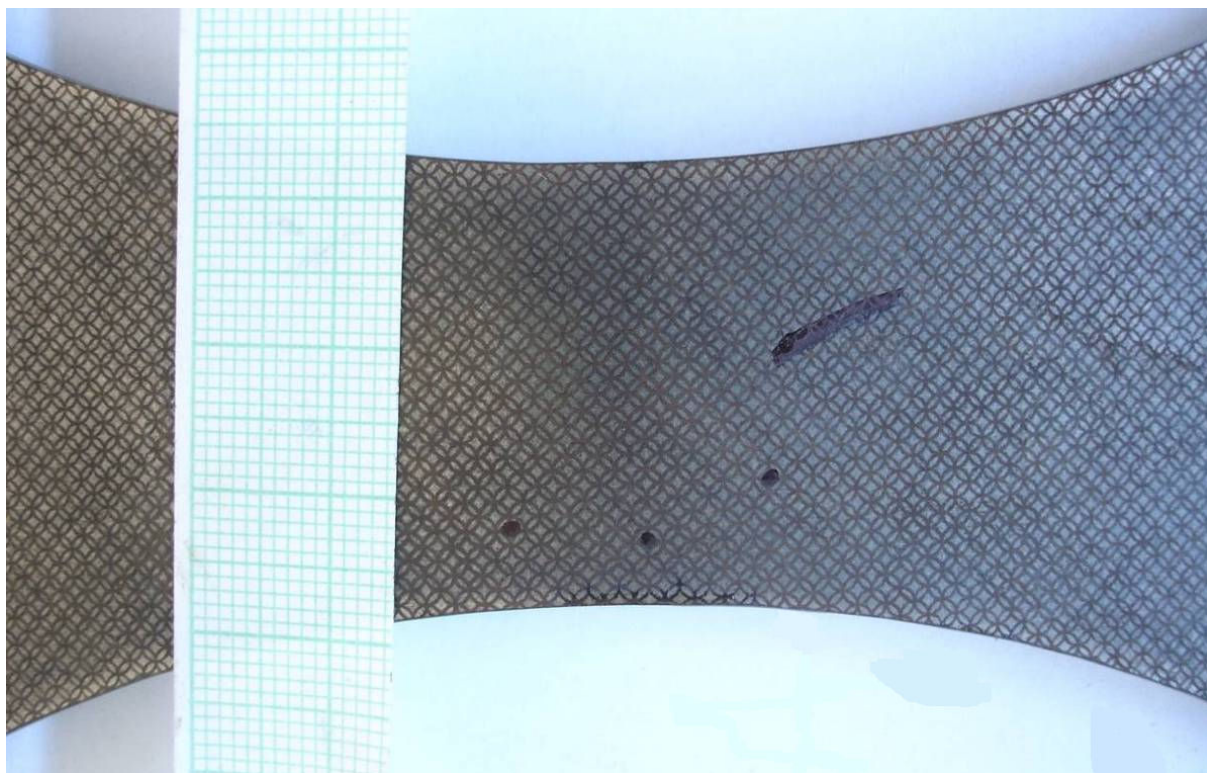


Obr. 11.13. Vzorky o $2/3$ předdeformaci

Následující schéma vysvětluje způsob označování měřených vzorků:

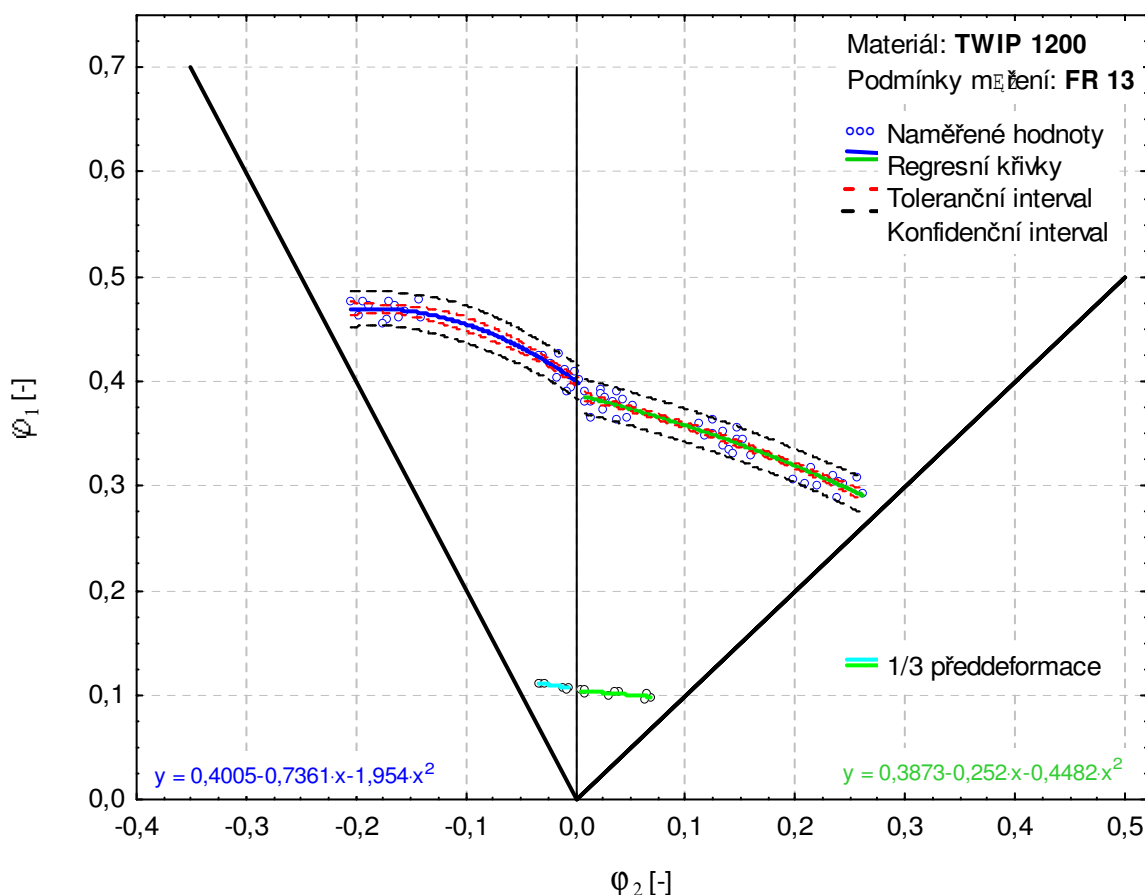
FR – 4 – 2/3 – 1 → **FR** - rychlost tažníku ($FP = v_1$, $FR = v_2$)
4 - deformační stopa (1÷5)
2/3 - velikost předdeformace (1/3, 2/3)
1 - číslo vzorku (1÷5)

Takto připravené vzorky byly připraveny na zjišťování DMP za vyšší rychlosti tažníku ($v_2 = 17,78$ m/s). Z tab. 11.5. je patrné, že se jedná o malá přetvoření a výrazně se zde projevuje odpružení. K určení, kde přesně v DMP se vzorky po provedení předdeformace vyskytovaly a také aby bylo možné hodnotit velikost přetvoření po předdeformaci a po dosažení mezního stavu vzorku jednoho a téže elementu, bylo nutno znát velikost přetvoření vybraného elementu po předdeformaci. Z tohoto důvodu byly všechny použité vzorky orýsovány pro určení referenčních bodů a společně s měřítkem foceny digitálním fotoaparátem. Jako měřítko (kvůli kalibraci měření délek pomocí softwaru **Image-Pro Plus**) byl ke každému snímku přiložen milimetrový papír. Bylo tedy zaručeno, že po dosažení mezního stavu se měřil stejný element i pro předdeformaci. Z důvodu malého rozptylu velikosti těchto elementů po předdeformaci byly pro každou stopu měřeny pouze tři elementy. Na obr. 11.14. je ukázka jednoho pořízeného záznamu předdeformovaného vzorku.



Obr. 11.14. Digitální snímek předdeformovaného vzorku (**FR-1-1/3-2**)

Výše popsaným postupem byl stanoven DMP pro rychlost tažníku $v_2 = 17,78 \text{ m/s}$ a předdeformaci 1/3 (dále označovaný jako **FR 13**). Výsledný DMP je na obr. 11.15. V tab. 11.6. jsou regresní koeficienty pro KMP (**silně**) a také 1/3 předdeformace (slabě). Regresní koeficienty pro 1/3 předdeformaci jsou však spíše jenom orientační a podávají informaci o tom, v jaké oblasti DMP se materiál po provedení předdeformace nacházel a nepřímo také o velikosti odpružení.



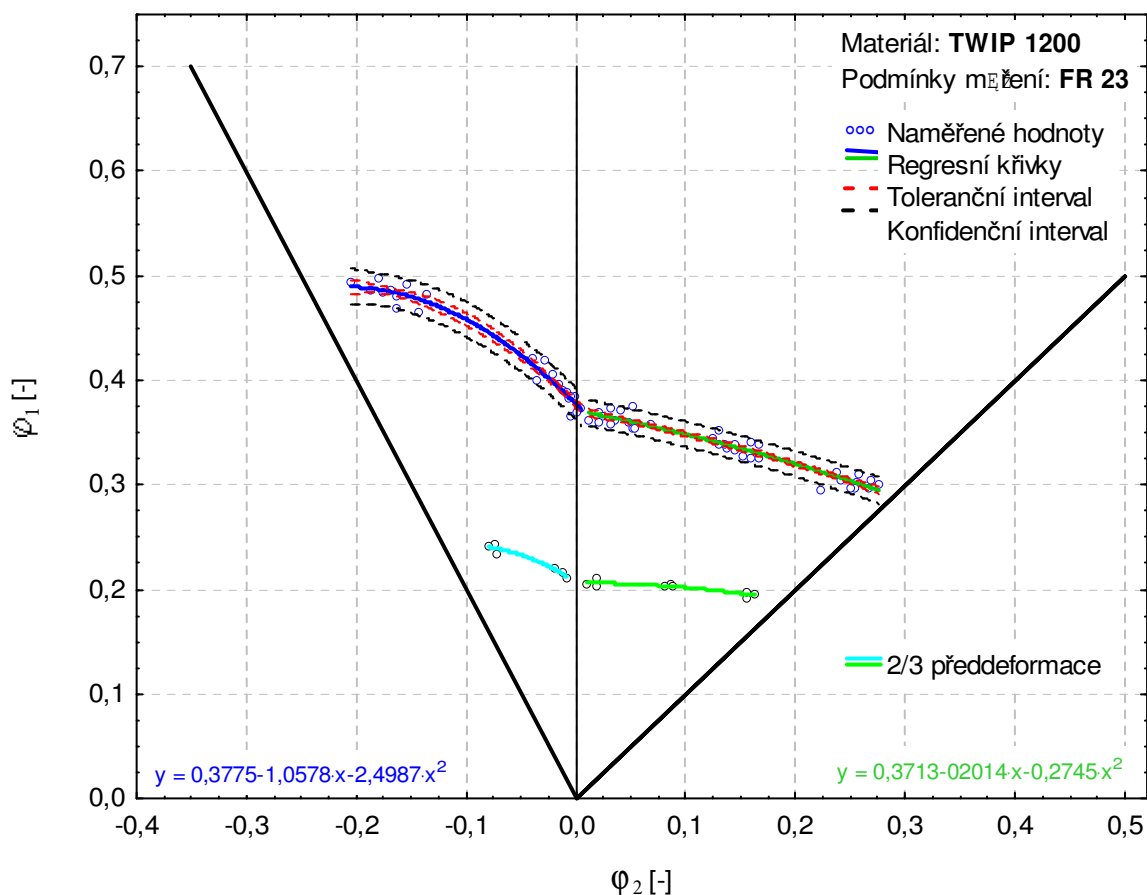
Obr. 11.15. DMP při rychlosti tažníku $v_2 = 17,78 \text{ m/s}$ a předdeformaci 1/3 (**FR 13**)

Tab. 11.6. Regresní koeficienty DMP při rychlosti tažníku $v_2 = 17,78 \text{ m/s}$ a velikosti předdeformace 1/3

| DMP – FR 13 | Levá větev DMP | | | Pravá větev DMP | | |
|----------------------|----------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|
| Regresní koeficienty | A | B | C | A | B | C |
| | 0,4005 | -0,7361 | -1,954 | 0,3873 | -0,252 | -0,4482 |
| | 0,1043 | -0,3348 | -3,9231 | 0,1045 | -0,0775 | -0,1927 |

11.7. DMP při rychlosti tažníku $v_2 = 17,78 \text{ m/s}$ a předdeformaci 2/3

Stejným postupem jako v minulé kapitole byl stanoven DMP pro rychlost tažníku $v_2 = 17,78 \text{ m/s}$ a předdeformaci 2/3 (**FR 23**). Výsledný DMP je na obr. 11.16. V tab. 11.7. jsou regresní koeficienty pro KMP (**silně**) a také 2/3 předdeformaci (**slabě**).



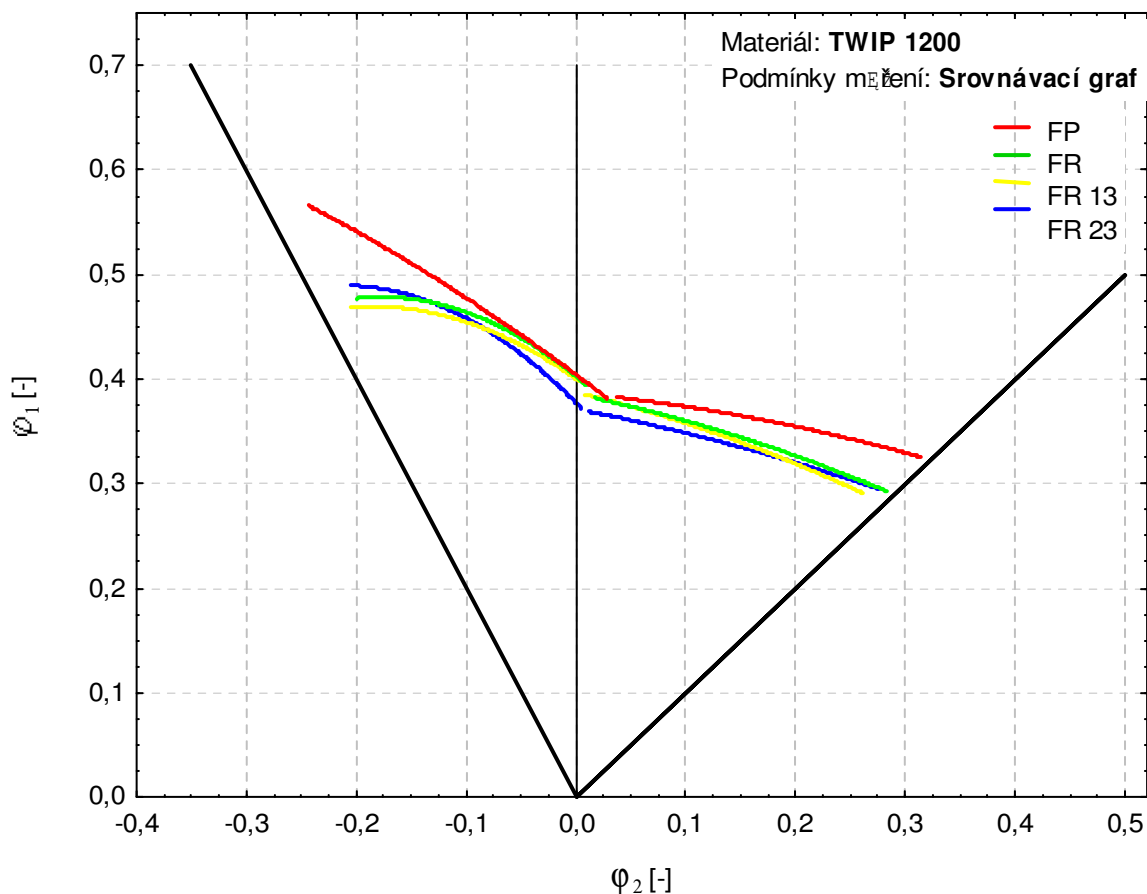
Obr. 11.16. DMP při rychlosti tažníku $v_2 = 17,78 \text{ m/s}$ a předdeformaci 2/3 (**FR 23**)

Tab. 11.7. Regresní koeficienty DMP při rychlosti tažníku $v_2 = 17,78 \text{ m/s}$ a velikosti předdeformace 2/3

| DMP – FR 23 | Levá větev DMP | | | Pravá větev DMP | | |
|----------------------|----------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|
| Regresní koeficienty | A | B | C | A | B | C |
| | 0,3775 | -1,0578 | -2,4987 | 0,3713 | -0,2014 | -0,2745 |
| | 0,2064 | -0,0026 | -0,428 | 0,2074 | -0,6708 | -3,192 |

11.8. Srovnání DMP za všech podmínek měření

Vlastní porovnání výsledných DMP lze provést pomocí DMP na obr. 11.17., který obsahuje KMP za všech podmínek měření.



Obr. 11.17. DMP za všech podmínek měření

Tab. 11.8. Regresní koeficienty DMP za všech podmínek měření

| Podmínky měření | Levá větev DMP | | | Pravá větev DMP | | |
|-----------------|----------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|
| | A | B | C | A | B | C |
| FP | 0,4043 | -0,7824 | -0,4873 | 0,3864 | -0,0964 | -0,3128 |
| FR | 0,4027 | -0,8547 | -2,4092 | 0,3855 | -0,2144 | -0,402 |
| FR 13 | 0,4005 | -0,7361 | -1,954 | 0,3873 | -0,252 | -0,4482 |
| FR 23 | 0,3775 | -1,0578 | -2,4987 | 0,3713 | -0,2014 | -0,2745 |

11.9. Dílčí závěr (DMP)

Z obr. 11.17. jsou patrné hlavní charakteristiky nejen při srovnání všech měřených DMP mezi sebou. Pro popis chování sledovaného materiálu pro každý DMP zvlášť je vhodné použít DMP vykreslené v předcházejících kapitolách.

Při podmínkách měření označovaných jako **FP**, kdy rychlost pohybu tažníku byla $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4}$ m/s, je ohraničená bezpečná oblast tváření pro vysokopevnostní materiál značně netypická a to především obsahem svojí plochy. V levé části větve KMP se dostáváme k hodnotám $\varphi_1 \approx 0,55$, což je v souladu s výsledky naměřenými během statické zkoušky tahem, jelikož tento stav přetvoření ($m_\varphi = -0,5$) odpovídá podmínkám během tahové zkoušky. Se změnou stavu napjatosti následně dochází k velkému poklesu levé větve KMP. Pokles pravé části KMP již není tolik výrazný a při stavu přetvoření $m_\varphi = 1$ se dostáváme na hodnotu $\varphi_1 \approx 0,33$. Objasnění skutečnosti poměrně velké bezpečné oblasti pro tváření tohoto materiálu podává naměření rozložení přetvoření po vrchlíku (pro stav $m_\varphi = 1$) pomocí optického systému **ARGUS – v6.1.0-5**. Stejně jako v případě statické zkoušky tahem, také zde je velká deformace docílena pomocí postupného přetvoření celého tvářeného objemu materiálu pomocí vytváření dvojčat během deformace.

Výsledky DMP pro vyšší rychlost tažníku ($v_2 = 17,78$ m/s - **FR**) sice vykazují určitý pokles oproti podmínkám **FP**, kdy největšího snížení polohy KMP bylo dosaženo pro oba krajní stavy napjatosti ($m_\varphi = -0,5$ a $m_\varphi = 1$). Vzhledem k velkému gradientu mezi použitými rychlostmi tažníku ($v_1 = 1,17 \times 10^{-5}$ - v_2) se však jedná o minimální pokles. Hodnoty v levé části KMP pro všechny tři podmínky měření ($m_\varphi = -0,5$) odpovídají hodnotám tažnosti **A_{50mm}** pro vyšší rychlosti deformace a vykazují také mnohem větší konkávnost než v případě podmínek **FP**. V pravé části však mají všechny sledované KMP spíše lineární charakter. Srovnání KMP za různých podmínek předdeformace ukazuje, že provedená předdeformace téměř neovlivňuje pozici KMP v diagramu. Lze vysledovat drobný pokles KMP při stavu přetvoření $m_\varphi = 0$ (především pro DMP za podmínek **FR 23**), jeho velikost však není výrazná. V levé části této KMP byly naopak naměřeny největší hodnoty přetvoření ($\varphi_1 \approx 0,48$) z těchto tří podmínek testování. Pro stav přetvoření $m_\varphi = 1$ jsou KMP pro všechny podmínky (**FR**, **FR 13** a **FR 23**) téměř totožné. Podle výsledků DMP lze tedy říci, že předdeformace nemá téměř žádný vliv na polohu KMP a vliv změny rychlosti tažníku je minimální.

12. Diskuze výsledků disertační práce

Experimentální část předkládané disertační práce obsahuje poměrně značné množství tabulek a grafů, což je dáno hlavním cílem samotného měření, který měl podat základní přehled zejména o mechanických vlastnostech a tvářitelnosti materiálu TWIP 1200. Z tohoto důvodu je tato část práce také rozdělena na dvě hlavní oblasti a sice měření pomocí statické zkoušky tahem a zjištění DMP jako jistých oblastí plasticity daného materiálu.

Výsledky ze statické zkoušky tahem potvrzují velmi obtížnou zařaditelnost tohoto materiálu mezi používané skupiny materiálů. Pevnostní charakteristiky jsou velmi vysoké ($R_{p0,2} \approx 590 \text{ MPa}$ a $R_m > 1100 \text{ MPa}$) a podobné hodnotám, které jsou typické pro vysokopevnostní materiály. Z hlediska naměřené tažnosti ($A_{50\text{mm}} = 50\div 60\%$) naopak dosahuje tento materiál hodnot, které jsou běžné pro hlubokotažné materiály. Zde však platí $A_g \approx A_{50\text{mm}}$. Jedná se o velmi vhodnou kombinaci těchto vlastností. Na základě získaných výsledků lze říci, že rychlost deformace poněkud snižuje všechny tyto materiálové charakteristiky. Nejedná se však o velký pokles hodnot.

Testovaný materiál je izotropním materiálem, což potvrzují nejen výsledky z měření anizotropie, ale také vlastní porovnání naměřených materiálových charakteristik vůči směru odebrání. Jedná se totiž o minimální rozdíly, které jsou dány spíše statistickou chybou než směrovostí vlastností.

Specifické výsledky lze najít při zjišťování aproximačních koeficientů statické zkoušky tahem. Jak modul monotónního zpevnění C , tak exponent deformačního zpevnění n vykazují nezvykle vysoké hodnoty ($C \approx 2300 \text{ MPa}$ a $n \approx 0,43$). Výsledné hodnoty jsou však ovlivněny nejen použitou rychlostí deformace, kde je stejná závislost jako u materiálových charakteristik, ale především použitým aproximačním intervalem. Pro testování byly vybrány dva intervaly, které předepisují používané normy. Jednalo se o interval $\varphi \in <10;20>\%$ a $\varphi \in <5\%; R_m>$. Získané výsledky obou sledovaných koeficientů byly pro druhý z použitých aproximačních intervalů vždy vyšší než v prvním případě. Interval $\varphi \in <5\%; R_m>$ je tedy pro sledovaný materiál poněkud méně „přísný“. Na obr. 9.19. (strana 106) je však vidět, že aproximace pomocí tohoto intervalu je méně přesná než v případě druhého použitého intervalu. Tato skutečnost je samozřejmě dána velikostí daného intervalu. Především z tohoto důvodu pokládám výsledky z intervalu $\varphi \in <10;20>\%$ za více relevantní a přesné.

Patrně nejzajímavější výsledky byly naměřeny pomocí optického měření deformace vzorku systémem **ARAMIS – v6.1.1-2**. V důsledku zcela jiného principu měření byl ukázán samotný průběh deformace v měřené části vzorku během celé zkoušky tahem. Velikostně výsledky odpovídají hodnotám zjištěných klasickou zkouškou tahem ($\epsilon \approx 50-60\%$). Tento způsob měření však dokázal objasnit chování testovaného materiálu během celého průběhu zkoušky. Je názorně patrné, že až do velikosti $\epsilon \approx 30\%$ dochází k homogenní deformaci v celém objemu. Následně dochází vlivem deformace dvojčatěním k postupnému protváření celého objemu. Na měřeném vzorku se tento jev projevuje jako určité „vlny“, které postupně procházejí zleva doprava (díky posunu pouze spodní čelisti trhačického zařízení) měřeným materiálem a postupně tak zvyšují jeho celkové přetvoření. Dochází k postupnému vyčerpávání plasticity v celém objemu materiálu, až v určitém místě dojde k lokalizaci, vytvoření špičky této deformace ($\epsilon > 70\%$) a následnému lomu materiálu. Takovýto průběh procesu plastické deformace se na záznamech ze statické zkoušky tahem projevuje jako rozkmitání smluvního napětí **R** v závislosti na posunu průtahoměru. Zachycení takového procesu deformace a možné výstupy ve formě nejen obrázků, ale také ve video formátu, patří mezi velké výhody optického měření deformace pomocí systému **ARAMIS**.

Určení vlivu BH efektu a velikosti předdeformace na testovaný materiál vykázalo poměrně jednoznačné závěry. BH efekt téměř neovlivňuje výsledné materiálové charakteristiky a lze tedy přepokládat, že jejich hodnoty po procesu vypalování laku (170° po dobu 20 min) zůstanou stejné. Předdeformace zvyšuje velikost meze kluzu **R_{p0,2}** díky pracovnímu zpevnění (**W1 = 46,77 MPa** a **W5 = 147,33 MPa**). Nemá však vliv na výslednou tažnost **A_{50mm}**. Také pro tyto podmínky měření byly pro všechny zkoušky následně nalezeny aproximace podle Swifta-Krupkovského a zjištěny tak velikosti regresních koeficientů **C**, **n** a **φ₀**. S ohledem na skutečnost, že proces zatížení materiálu teplotním cyklem a předdeformací neovlivňuje výsledné velikosti materiálových charakteristik, také jejich hodnoty (**C ≈ 2300 MPa** a **n ≈ 0,425**) jsou obdobné výsledkům naměřených pro zkoušku tahem. Pracovní zpevnění **W** pouze poněkud navýšilo velikost posunutí křivky zpevnění **φ₀** (**0,035 → 0,045**). Porovnání obou regresních koeficientů podle použitého aproximačního intervalu jenom potvrzuje již výše zmíněnou skutečnost, že interval **φ ∈ <5%; R_m>** má ve svém výsledku vyšší hodnoty obou koeficientů, je však méně přesný než **φ ∈ <10;20>%**.

V průběhu experimentu se ukázalo jako vhodné zařadit také kapitolu o ovlivnění výsledných materiálových charakteristik volbou technologie přípravy vzorků. K vlastnímu porovnání byly použity čtyři technologie – stříhání, frézování, broušení a řezání vodním paprskem s následným jemným broušením hrany vzorku. Naměřené výsledky rozdělily tyto technologie do dvou skupin. První z nich představuje stříhání a frézování, kdy došlo k výraznému poklesu tažnosti až na hodnotu $A_{50mm} \approx 20\%$. Pevnostní charakteristiky následně odpovídají této hodnotě ($R_m \approx 960 \text{ MPa}$). V obou těchto případech se do materiálu samotnou technologií vnáší velké množství mikrotrhlin (v případě frézování lze hovořit již o trhlinách), což má za následek předčasné porušení materiálu. V případě frézování dochází spíše k rozrušení materiálu značně do hloubky než k plynulému obrábění. Druhou skupinu tvoří technologie broušení a řezání vodním paprskem s následným jemným broušením. Samotné broušení dosahuje o něco nižších hodnot ($A_{50mm} \approx 50\%$ a $R_m \approx 1100 \text{ MPa}$) než výsledky ze samotné statické zkoušky tahem. Tento rozdíl je patrný i ve snímcích povrchů pro dané technologie, kde v případě jemného broušení nedochází k téměř žádné změně povrchové vrstvy.

Naměřené výsledky v případě DMP určily meze použitelnosti tohoto materiálu za různých podmínek testování – označované jako **FP**, **FR**, **FR 13** a **FR 23**. Levé části KMP odpovídají výsledkům ze statické zkoušky tahem a to i pro vyšší rychlosti deformace. Velmi důležitou skutečností v DMP je poměrně malý posun DMP za vyšší rychlosti tažníku ($v_2 = 17,78 \text{ m/s}$). Pro stopu č. 3 ($m_\phi = 0$) se dokonce výsledné KMP překrývají. Z hlediska velikosti předdeformace (**FR 13** a **FR 23**) a jejich vlivu na pozici KMP se znovu projevila skutečnost zjištěná již při zkoušce tahem. Opět se totiž ukázalo, že předdeformace nemá na tento materiál téměř žádný vliv a došlo pouze k nepatrnému posunu KMP. Jednotlivé rozdíly mezi KMP jsou spíše v rámci konfidenčního intervalu.

I pro případ zjišťování DMP se projevila značná podpora lepšího poznání vlastního chování materiálu TWIP 1200 během deformace v případě využití optického systému měření deformace. V tomto případě se jednalo o systém **ARGUS**, který je však schopen vyhodnotit pouze koncový stav. Pomocí tohoto zařízení byl také zde potvrzen předpoklad homogenní deformace v celém objemu materiálu a tím jeho dokonalé protváření v celém objemu, což umožňuje dosažení velkých přetvoření vrchlíku ($\phi_1 = \phi_2 \approx 0,3$). Nedochází tedy k lokalizaci deformace kolem trhliny, což je charakteristické pro většinu vysokopevnostních materiálů (např. **Docol 1200M**).

13. Doporučení pro další výzkum

Je třeba zdůraznit, že celá tato disertační práce je zaměřena především na popsání a charakterizování tvářitelnosti nového a stále ještě spíše vyvíjeného materiálu, který se do značné míry odlišuje od známých a používaných materiálů. Hlavním úkolem bylo provést především určité seznámení se s testovaným materiálem TWIP 1200 a nalezení určitých „záchytných bodů“ pro další navazující výzkum. Během testování a navrhování postupů, jak přistupovat k testovanému materiálu a zjišťovat potřebné hodnoty různých veličin, se však objevilo velké množství otázek a možných dalších cest, které mohou vést k mnohem lepšímu poznání chování daného materiálu a je tedy vhodné alespoň některé z nich zmínit.

Celkové popsání tvářitelnosti jednoho materiálu zdaleka přesahuje rámec jedné práce. Z tohoto důvodu není v této práci věnována pozornost např. vlivu tloušťky, velikosti odpružení, vzniku a průběhu vlastního lomu apod.

Další výzkum v oblasti pochopení a charakterizování chování daného materiálu by měl ve velké míře směřovat do měření deformace pomocí optických metod. Již v této práci se ukázalo, že takovýto přístup dokáže odhalit jistá tajemství, které běžné testování nedokáže přiblížit. Vzhledem k zakoupení jednoho z takovýchto systémů na Katedru strojírenské technologie bude jistě i naší velkou ambicí do budoucna široké využívání tohoto zařízení. Snahou by mělo být rozšířit měření např. na proces tažení výlisku karosářského typu a nebo sledovat proces měření DMP.

Jako velmi vhodné se ukazuje rozšíření zkoumání rozdílných TWIP materiálů o sledování vlivu chemického složení na následné plastické vlastnosti. V této práci byl testován pouze jeden TWIP materiál, ale škála možností, kterou s sebou přináší rozdílné chemické složení, znamená velmi širokou oblast dosažitelných mezí tohoto materiálu. Velký zájem by měl v budoucnu směřovat také do určování struktury pomocí metalografie. Získat v současné době snímky struktury tohoto materiálu je (vzhledem např. ke znalostem leptání materiálu) velmi obtížné. V neposlední řadě se ukazuje jako velmi důležité blíže poznat chování takového materiálu za různých zpracovatelských technologií (např. při bodovém svařování). Spolu s **cenou**, jenž je **cca 3x vyšší** než pro ostatní vysokopevnostní materiály, je značná neznalost v těchto oblastech v současné době velkou brzdou širší aplikace měřeného materiálu TWIP 1200 ve strojírenském průmyslu.

14. Závěr

Předkládaná disertační práce byla vypracována s ohledem na nedostačující znalosti a potřeby vymezení použitelnosti nově vyvíjeného materiálu, který bývá obecně řazen do skupiny vysokopevnostních materiálů. Samotné označení materiálu **TWIP** (**TW**inning **I**nduced **P**lasticity – plasticita indukovaná dvojčatěním) popisuje základní charakteristiku testovaného materiálu. Svým chováním a velikostí materiálových charakteristik se však velmi odchyluje od materiálů používaných v průmyslu a jeho zařazení je obtížné. Znalost intervalu použitelnosti z hlediska tváření, vymezení metod měření materiálových charakteristik a obecné podvědomí o tomto materiálu je v současné době velmi nedostačující vzhledem k možnostem a potenciálu, který tento materiál nabízí. Všechny takovéto nedostatky jsou vysoce omezujícím faktorem pro širší nasazení jakéhokoli materiálu. S ohledem na předpokládané specifické chování testovaného materiálu se jevílo jako velmi účelné provést verifikaci naměřených základních charakteristik pomocí moderních optických metod sloužících k měření deformací, které by také dokázalo do určité míry propojit obě hlavní složky experimentální části. Velkým omezujícím faktorem pro celou disertační práci bylo malé množství TWIP materiálu.

Prvotní částí testování materiálu TWIP 1200 byla statická zkouška tahem. Ukázalo se, že samotná příprava vzorků je velmi ovlivňujícím faktorem pro úspěšné zkoušení. Vzorky byly řezány vodním paprskem a následně zbaveny drobných nečistot pomocí jemného broušení. Pro testování byly vybrány tři rychlosti deformace (1, 10 a 600 mm/min) pro tři směry odebrání vzorků (0°, 45° a 90°). Stanoveny byly základní mechanické vlastnosti ($R_{p0,2}$, R_m a A_{50mm}). Byl stanoven také vliv BH efektu a předdeformace. K nalezení koeficientů aproximace podle Swifta-Krupkovského se musela najít vhodná metodika pomocí programu **OriginPro 7.5**, jelikož dosažené hodnoty se zcela vymykaly běžně používaným hodnotám. Tvar křivek zpevnění vykázal také velmi netradiční chování po dosažení určité velikosti poměrného prodloužení ($\epsilon > 30\%$), kdy začínalo docházet ke stále se zvětšujícímu rozkmitu zatěžující síly F . Bylo tedy nutné nalézt novou metodiku měření testovaného materiálu zkouškou tahem, která by umožnila zobrazit celý proces v jakémkoli okamžiku stavu deformace. Výsledkem bylo použití optického měření deformace pomocí systému **ARAMIS**. Výsledky potvrdily předpoklady průběhu deformace

během zkoušky tahem, kdy dochází k postupnému protváření celého objemu materiálu. Průběh deformace ve vybrané oblasti a grafické znázornění samotného postupu této deformace vzorkem patří patrně k nejdůležitějším výsledkům této práce, jelikož umožnily bližší popsání charakteru deformace materiálu.

S ohledem na zkušenosti při hledání vhodné technologie přípravy vzorků pro zkoušky tahem se ukázalo jako velmi vhodné provést proměření a porovnání jednotlivých technologií mezi sebou, především vzhledem k dosažitelným velikostem tažnosti. Tímto způsobem byl potvrzen velký vliv samotné volby přípravné technologie na výsledné materiálové charakteristiky materiálu.

Především s ohledem na možnosti a zkušenosti Katedry strojírenské technologie se k nalezení „map plasticity“ použila metodika zjišťování DMP pomocí vypínání připravených tvarových vzorků polokulovým tažníkem. Byly využity čtyři podmínky testování (**FP**, **FR**, **FR 13** a **FR 23**). Provedené měření nejenom určilo KMP pro každou podmínku měření, ale také potvrdilo výsledky naměřené ze statické zkoušky tahem. Opět se totiž neprokázal vliv velikosti předdeformace na výsledné vlastnosti materiálu TWIP 1200, ale také nebyl pozorován velký pokles oblastí použitelnosti při zvýšení rychlosti tažníku z $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4}$ m/s na $v_2 = 17,78$ m/s. Velmi důležitým výstupem jsou však opět naměřené snímky jednoho ze stavů přetvoření ($m_\varphi = 1$) znovu pomocí optického snímání deformace – tentokrát systémem **ARGUS**. Ukázaly, že s pomocí znalosti rozložení hlavní deformace po celém vrchlíku lze výhodně charakterizovat rozdíly v různých materiálech, které mohou v pravé části KMP výběrem elementů dosáhnout téměř stejných hodnot.

Naměřené hodnoty předurčují zkoumaný materiál pro **tvarově velmi členité výlisky**, které jsou podrobeny velkému přetvoření. Zároveň však (s ohledem na pevnostní hodnoty) plní také bezpečnostní funkci. Na druhou stranu je třeba vzít v úvahu, že se jedná o výsledky **laboratorního testování**, které se může velmi lišit od podmínek skutečného provozu. Veškeré výsledky disertační práce mohou sloužit jako vstupní data pro **numerické simulování** chování materiálu TWIP 1200. Je však zřejmé, že provedené měření vymezuje jenom velmi malou část k bližšímu pochopení chování tohoto materiálu. Je nutné si uvědomit, že provedené závěry v žádném případě neuzavírají popsání a pochopení charakteru průběhu tváření materiálu TWIP 1200. Jedná se spíše o prvotní snahu k položení základů ohledně tohoto materiálu. Otevírají nové, poměrně velmi široké okruhy dalších témat, které je potřeba v dalších letech podrobit dalšímu zkoumání.

15. Seznam použité literatury

- [1] ASHBY, M.F.: Materials Selection in Mechanical Design, Pergamon Press, Oxford, 2005, ISBN 0-7506-6168-2
- [2] JÍRA, M.: Úspora hmotnosti automobilové karoserie použitím pevnostních plechů, Diplomová práce, TU v Liberci, Liberec 1998
- [3] PTÁČEK, L.: Nauka o materiálu I., CERM, Brno, 2001, ISBN 80-7204-193-2
- [4] PLÁNIČKA, F. – KULIŠ, Z.: Základy teorie plasticity, ČVUT, Praha, Vydavatelství ČVUT, 142 stran, 2004
- [5] POČTA, B.: Základy teorie tváření kovů, SNTL, Praha, 1966, 512 stran
- [6] BARRETT, CH.S.: Struktura kovů, Nakladatelství ČSAV, Praha, 1959, 660 stran
- [7] HERTZBERG R.W.: Deformation and fracture mechanics of engineering materials, John Wiley & Sons, New York, 1996, ISBN 0-471-01214-9
- [8] TALBERT, S.H. – AVITZUR, B.: Elementary Mechanics of Plastic Flow in Metal Forming, John Wiley & Sons, New York, 1996, ISBN 0-471-96003-9
- [9] PETRUŽELKA, J. – BŘEZINA, R.: Tvářitelnost kovových materiálů, VŠB, Ostrava, 2001
- [10] ALAXIN, J.: Fyzikální metalurgie I., skripta VŠST, Liberec, 1986
- [11] TMĚJ, J. – MIKEŠ, V. : Teorie tváření, skripta VŠST, Liberec, 1990, ISBN 80-7083-011-5
- [12] SMALLMAN, R.E.: Moderní nauka o kovech, SNTL, Praha, 1965, 320 stran
- [13] ALAXIN, J.: Fyzikální metalurgie II., skripta VŠST, Liberec, 1987
- [14] KIBEY, S. – LIU, J.B. – JOHNSON, D.D. – SEHITOGLU, H.: Predicting twinning stress in fcc metals: Linking twin-energy pathways to twin nucleation. In: Acta Materialia 55: Twinning, Internetový sborník, 6843-6851, 2007, www.sciencedirect.com
- [15] YANG, P. – XIE, Q. – MENG, L. – DING, H. – TANG, Z.: Dependence of deformation twinning on grain orientation in a high manganese steel. In: Scripta Materialia 55: Twinning, Internetový sborník, 629-631, 2006, www.sciencedirect.com
- [16] BOUAZIZ, O. – ALLAIN, S. – SCOTT, C.: Effect of grain and twin boundaries on the hardening mechanisms of twinning-induced plasticity steels. In: Scripta Materialia 58: Twinning, Internetový sborník, 484-487, 2007, www.sciencedirect.com
- [17] BARNETT, M.R.: Twinning and the ductility of magnesium alloys Part I: „Tension“ twins. In: Materials Science&Engineering A 464: Twinning, Internetový sborník, 1-7, 2007, www.sciencedirect.com
- [18] BARNETT, M.R.: Twinning and the ductility of magnesium alloys Part II: „Contraction“ twins. In: Materials Science&Engineering A 464: Twinning, Internetový sborník, 8-16, 2007, www.sciencedirect.com

- [19] ČSN – EN 10002-1: Kovové materiály, Zkouška tahem pro kovové materiály, 2004
- [20] VELES, P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov, SNTL, Praha, 1989
- [21] Aktualizace názvů a označování mechanických parametrů, Statická zkouška tahem, Norma, 2007
- [22] ČSN ISO 10275: Kovové materiály. Stanovení exponentu deformačního zpevnění plechů a pásů, 1995
- [23] ASTM E 646 – 78: Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-values) of Metallic Sheet Materials, 2000
- [24] MARCINIAK, Z. : Teorie tváření plechů, SNTL, Praha, 1964
- [25] SOLFRONK, P.: Vliv morfologie povrchu plechu na rozvoj deformace při tažení výlisků z plechu, Disertační práce, TU v Liberci, Liberec 2002
- [26] BUCHAR, Z.: Diagramy mezních přetvoření tenkých hlubokotažných plechů, Kandidátská disertační práce, TU v Liberci, Liberec 1987
- [27] DOUBEK, P.: Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace, Disertační práce, TU v Liberci, Liberec 2004
- [28] SOBOTKA, J.: Zhodnocení použití pevných a polotuhých mazadel v sériové výrobě při lisování výlisků karosářského typu, Diplomová práce, TU v Liberci, Liberec 2004
- [29] BILLY, J.: Trendy vývoja ocelových plechov pre ľahké automobilové konštrukcie, Hutnícké listy č.3, 1999, s. 16–21
- [30] RUMÍŠEK, P.: Plošné a objemové tváření (vícejazyčné názvosloví), skripta VUT, Brno, 2004
- [31] TSAKIRIS, V. – EDMONDS, D.V.: Martensite and deformation twinning in austenitic steels. In: Materials Science&Engineering A 273-275: Twinning, Internetový sborník, 430-436, 1999, www.sciencedirect.com
- [32] ALLAIN, S. - CHATEAU, J.-P. – BOUAZIZ, O.: A physical model of the twinning-induced plasticity effect in a high manganese austenitic steel. In: Materials Science&Engineering A 387-389: Twinning, Internetový sborník, 143-147, 2004, www.sciencedirect.com
- [33] BOUAZIZ, O. –GUELTON, N.: Modelling of TWIP effect on work-hardening. In: Materials Science&Engineering A 319-321: Twinning, Internetový sborník, 246-249, 2001, www.sciencedirect.com
- [34] CHEN, Z. – CAI, H. – Li, S. – ZHANG, X. – WANG, F. – TAN, CH.: Analysis of crystallographic twinning and slip in fcc crystals under plane strain compression. In: Materials Science&Engineering A 464: Twinning, Internetový sborník, 101-109, 2007, www.sciencedirect.com
- [35] MENG, L. - YANG, P. – XIE, Q. –. – DING, H. – TANG, Z.: Dependence of deformation twinning on grain orientation in compressed high manganese steels. In: Scripta Materialia 56: Twinning, Internetový sborník, 931-934, 2007, www.sciencedirect.com

- [36] GRÄSSEL, O. – KRÜGER, L. – FROMMEYER, G. – MEYER, L.W.: High strength Fe-Mn-(Al,Si) TRIP/TWIP steels development-properties-application. In: International Journal of Plasticity 16: Twinning, Internetový sborník, 1391-1409, 2000, www.sciencedirect.com
- [37] Wikipedia: Mangan [07.02.2008]
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Mangan>>
- [38] ALLAIN, S. - CHATEAU, J.-P. – DAHMOUN, D. - BOUAZIZ, O.: Modeling of mechanical twinning in a high manganese content austenitic steel. In: Materials Science&Engineering A 378-389: Twinning, Internetový sborník, 272-276, 2004, www.sciencedirect.com
- [39] JANDOŠ, F. – ŘÍMAN, R. – GEMPERLE, A.: Využití moderních laboratorních metod v metalografii, SNTL, Praha, 1985
- [40] GOM: Optical Measuring Techniques ARAMIS, [17.08.2008]
<<http://www.gom.com/EN/measuring.systems/aramis/system/system.html>>
- [41] ČSN 01 0250: Statistické metody v průmyslové praxi. Všeobecné základy, 1973
- [42] GOM: Optical Measuring Techniques ARGUS, [17.08.2008]
<<http://www.gom.com/EN/measuring.systems/argus/system/system.html>>
- [43] NEKVINDA, M.: Matematika I., skripta TUL, Liberec, 1997, ISBN 80-7083-261-4

16. Publikační činnost

Publikace k zaměření disertační práce:

- [1] SOBOTKA, J: Plastic Properties of TWIP Sheets. Sborník příspěvků. Mezinárodní Baťova doktorandská konference 2008, 12.4. 2008, Zlín, ISBN 978-80-7318-663-0 (CD ISBN 978-80-7318-664-7)
- [2] SOBOTKA, J.: Mechanical Properties of New High-Strength Materials. In: Sborník mezinárodní konference ERIN 2008, Bratislava, duben 2008, SR, ISBN 978-80-227-2849-2
- [3] SOBOTKA, J.: Evaluation of Mechanical Properties for TWIP Sheets. In: Sborník konference - METAL 2008, Hradec nad Moravicí, květen 2008, ČR, s.44, CD, ISBN 978-80-254-1987-8

Publikace za období 2007-2008:

- [4] SOBOTKA, J.: Evaluation of Fields of Temperature on Simple Stamping depending on Holding Pressure. ICTKI 2008, 23-25.1. 2008, UJEP Ústí nad Labem, Ústí nad Labem, ČR, s.216-217, CD, ISBN 978-80-7044-969-1
- [5] SOBOTKA, J.: Evaluation Using Hotmelt Lubricants by Series Production from the Tribological Point of View. 12.4. 2007, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, ČR, s. 262, CD, ISBN 978-80-7318-529-9
- [6] SOBOTKA J.: Evaluation of Using Drylubes and Semidrylubes Lubrication in Series Production Stamping of Car Body Mouldings. In: METAL 2007, 16. mezinárodní konference metalurgie a materiálů, 22-24.5. 2007, Hradec nad Moravicí : TANGER, spol. s.r.o., Ostrava, ČR, s. 50, ISBN 978-80-86840-33-8
- [7] SOBOTKA, J. -SOLFRONK, P. - KOLNEROVÁ , M. - DOUBEK, P.: Using Thermocamera for Observation Distribution of Temperature Fields by Forming. In: Technologia 2007, 19-20.9. 2007, Bratislava: Strojnicka fakulta STU v Bratislave, SR, s.82, CD, ISBN 978-80-227-2712-9
- [8] SOBOTKA, J: Observation of Deformation Speed Influence on Temperature Fields Distribution by Using Thermovision. In: TU Liberec – TU Dresden 2007, 5.9. 2007, ČR, Liberec: Fakulta strojní, CD, ISBN 978-80-7372-2498-4
- [9] DOUBEK, P. - SOLFRONK, P. – KOLNEROVÁ, M. - SOBOTKA, J.: Influence of loading speed on strenght of bonded joint. In: Technológia, 19.–20.9. 2007. Bratislava: STU v Bratislavě, 2007, SR, s.70 CD, ISBN 978-80-227-2712-9
- [10] DOUBEK, P. - KOLNEROVÁ, M. - SOLFRONK, P. - SOBOTKA, J.: Plastické vlastnosti vysokopevnostních materiálů dělené nestandardními technologiemi. In: 16. Mezinárodní konference METAL 2007, 22.-24.5. 2007. Hradec nad Moravicí, ČR, s.58-59 CD, ISBN 978-80-86840-33-8
- [11] KOLNEROVÁ, M. – SOBOTKA, J. - SOLFRONK, P.- DOUBEK, P.: Properties of metal sheets surface by manufacturing of car body stampings. In: 16. Mezinárodní konference METAL 2007, 22.-24.5. 2007, Hradec nad Moravicí, ČR, s. 10, Nb 166 ISBN 978-80-86840-33-8

- [12] KOLNEROVÁ, M. – SOBOTKA, J. - SOLFRONK, P.- DOUBEK, P.: Lubricants - their part and useability in stamping process. In: 10. Mezinárodní konference Technológia 2007, 19.-20.9. 2007, Bratislava : STU v Bratislavě. 2007, SR, s.75 CD, ISBN 978-80-227-2712-9
- [13] SOLFRONK, P.-SOBOTKA, J. -DOUBEK, P. - KOLNEROVÁ, M: Utilization of microphosphated sheets in automotive industry. In:16.Mezinárodní konference METAL 2007, 22.-24.5. 2007, Hradec nad Moravicí, ČR, s. 10, Nb 111 ISBN 978-80-86840-33-8
- [14] SOLFRONK, P.– SOBOTKA, J.- KOLNEROVÁ, M.- DOUBEK, P.: New type of protective coating for deep-drawing sheets using in automotive industry In: 10. Mezinárodní konference Technológia 2007, 19.-20.9. 2007, Bratislava : STU v Bratislavě. 2007, SR, s.82 CD. ISBN 978-80-227-2712-9

Publikace za rok 2005:

- [15] SOBOTKA, J.: Vyčerpání plastických vlastností při tažení výlisků z pevnostních plechů, XV. vědecké sympozium TU Liberec - TU Dresden, Liberec, ČR, 2005, 53 + CD, ISBN 80-7083-975-9
- [16] SOBOTKA, J.: Evaluation of using drylubes and semidrylubes lubrications in series production stamping of car body mouldings, Mezinárodní konference Juniormat '05, Brno, ČR, 2005, 335 - 338, ISBN 80-214-2984-4
- [17] SOBOTKA, J. – DOUBEK, P. – KOLNEROVÁ, M. – KOVÁRNÍK, L.: Stabilita procesu lisování s ohledem na použitý materiál, Forming 2005, Ostrava, ČR, 2005, 249 - 254, ISBN 80-248-0888-9
- [18] SOBOTKA, J. – DOUBEK, P. – KOLNEROVÁ, M. – KOVÁRNÍK, L.: Srovnání tribologických vlastností HDG a NIT plechů při použití maziv typu Hotmelt, Technológia 2005, Bratislava, SR, 2005, 105 + CD, ISBN 80-227-2264-2
- [19] KOVÁRNÍK, L. – SOBOTKA, J. – DOUBEK, P. – SOLFRONK, P.: Použití nelineárního modelu tření při simulaci tažení výlisku v PAM-STAMP 2G, Forming 2005, Ostrava, ČR, 2005, 129 - 132, ISBN 80-248-0888-9
- [20] KOVÁRNÍK, L. – SOBOTKA, J. – DOUBEK, P. – SOLFRONK, P.: Analýza rozložení deformace u výlisku z hlubokotažného plechu, Technológia 2005, Bratislava, SR, 2005, 101 + CD, ISBN 80-227-2264-2
- [21] KOVÁRNÍK, L. – SOBOTKA, J. – DOUBEK, P. – SOLFRONK, P.: Vliv použité metodiky měření na diagramy mezních přetvoření, Mezinárodní vědecká konference při příležitosti 55 let založení Fakulty strojní, Ostrava, ČR, 2005, 34 + CD, ISBN 80-248-0907-9
- [22] KOLNEROVÁ, M. – SOLFRONK, P. – SOBOTKA, J. – DOUBEK, P.: Vliv morfologie typu EBT na tribologické podmínky tažení, Forming 2005, Ostrava, ČR, 2005, 123 - 128, ISBN 80-248-0888-9
- [23] KOLNEROVÁ, M. – SOLFRONK, P. – SOBOTKA, J. – DOUBEK, P.: Vliv technologických parametrů na koeficient tření při tažení, Technológia 2005, Bratislava, SR, 2005, 100 + CD, ISBN 80-227-2264-2



17. Seznam příloh

1. Protokoly ze statické zkoušky tahem materiálu TWIP 1200.
2. Grafy pro určení materiálových konstant C a n materiálu TWIP 1200.
3. Data z naměřených DMP pro materiál TWIP 1200.
4. Snímky základních stavů rozložení deformace pomocí optického měření deformace (**ARAMIS**).
5. Hodnoty posunutí křivky zpevnění φ_0 materiálu TWIP 1200.



Protokoly ze statické zkoušky tahem materiálu TWIP 1200

(Příloha č. 1)



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

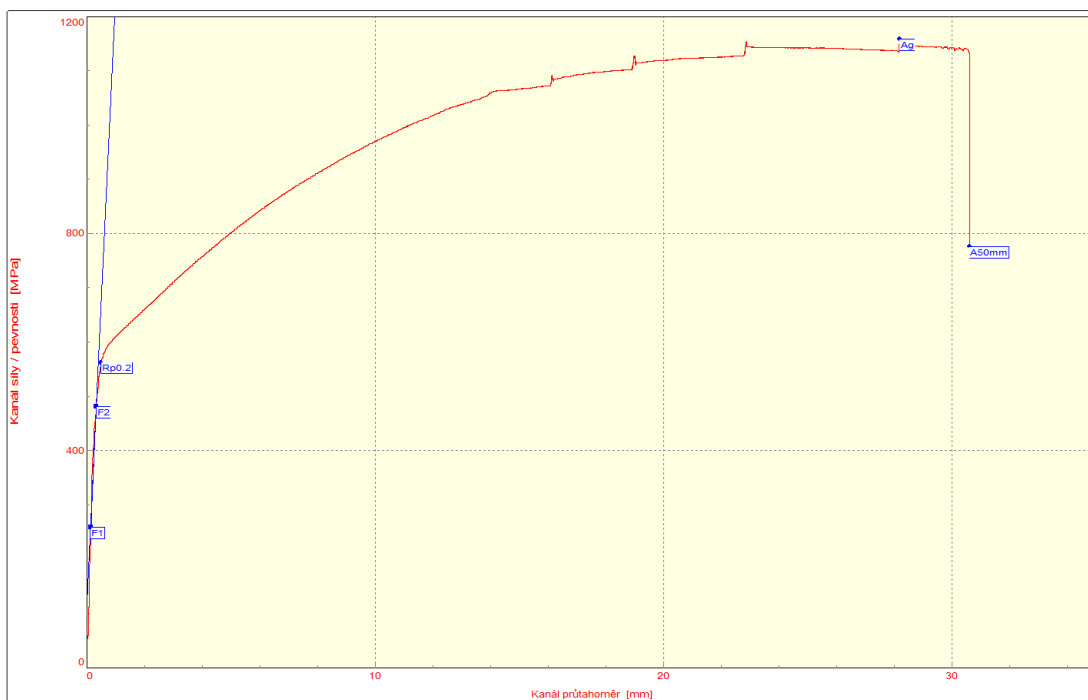
Testovaný materiál: : TWIP 1200
Norma: : ČSN EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Jiří Sobotka

Rychlost zatěžování: : 1 mm/min
Směr odebrání vzorku: : 0°
Datum zkoušky: : 14.4.2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------|-----------|---------|---------|-------|
| 1 | 559.04 | 1156.07 | 63.88 | 63.36 |
| 2 | 565.56 | 1169.55 | 61.13 | 53.64 |
| 3 | 561.49 | 1171.35 | 63.53 | 49.03 |
| 4 | 563.37 | 1168.69 | 64.51 | 61.88 |
| 5 | 562.71 | 1157.82 | 60.04 | 54.57 |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------------|-----------|---------|---------|-------|
| Počet zkoušek | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Průměrná hodnota | 562.44 | 1164.70 | 62.62 | 56.50 |
| Směrodatná odchylka | 2.40 | 7.16 | 1.93 | 5.99 |
| Minimální hodnota | 559.04 | 1156.07 | 60.04 | 49.03 |
| Maximální hodnota | 565.56 | 1171.35 | 64.51 | 63.36 |





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

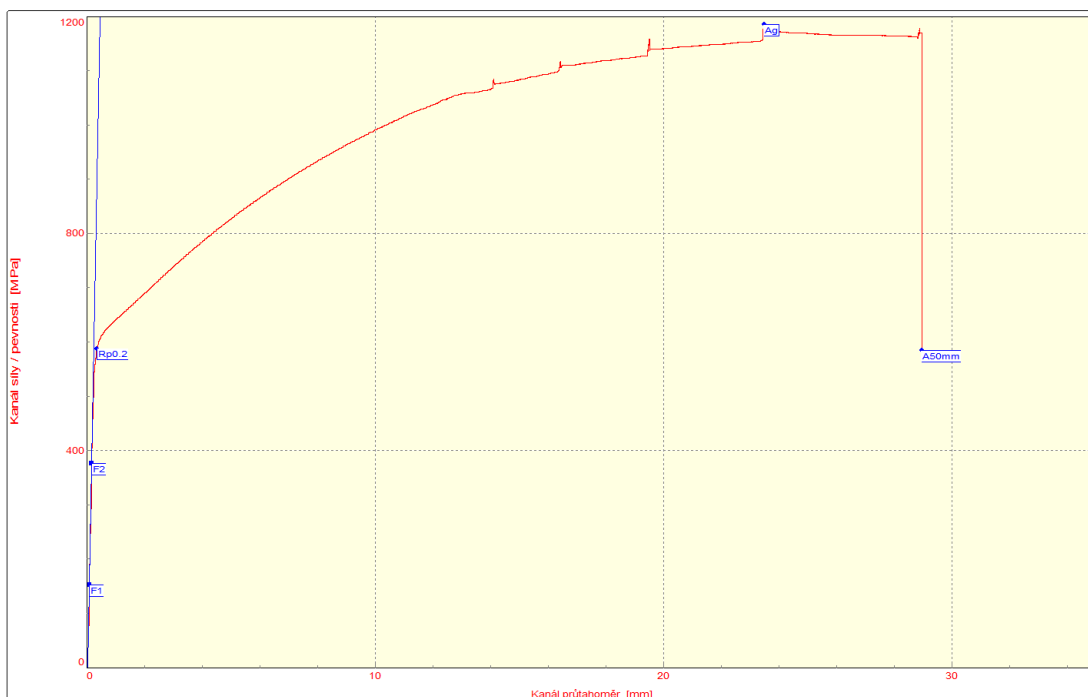
Testovaný materiál: : TWIP 1200
Norma: : ČSN EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Jiří Sobotka

Rychlost zatěžování: : 1 mm/min
Směr odebrání vzorku : 45°
Datum zkoušky: : 16.4.2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------|-----------|---------|---------|-------|
| 1 | 587.56 | 1184.24 | 57.39 | 46.02 |
| 2 | 584.70 | 1166.31 | 58.19 | 46.70 |
| 3 | 587.94 | 1179.49 | 59.04 | 47.44 |
| 4 | 585.19 | 1183.72 | 57.48 | 48.85 |
| 5 | 582.29 | 1189.74 | 60.10 | 47.81 |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------------|-----------|---------|---------|-------|
| Počet zkoušek | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Průměrná hodnota | 585.54 | 1180.70 | 58.44 | 47.36 |
| Směrodatná odchylka | 2.31 | 8.83 | 1.14 | 1.08 |
| Minimální hodnota | 582.29 | 1166.31 | 57.39 | 46.02 |
| Maximální hodnota | 587.94 | 1189.74 | 60.10 | 48.85 |





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

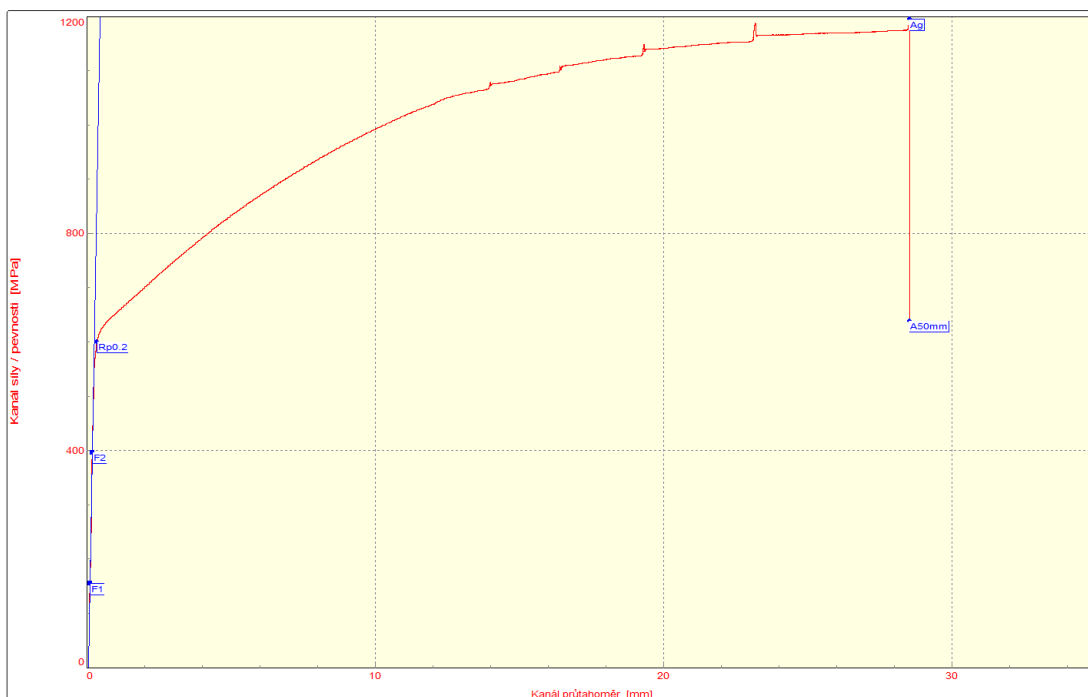
Testovaný materiál: : TWIP 1200
Norma: : ČSN EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Jiří Sobotka

Rychlost zatěžování: : 1 mm/min
Směr odebrání vzorku : 90°
Datum zkoušky: : 13.4.2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------|-----------|---------|---------|-------|
| 1 | 597.85 | 1191.38 | 58.49 | 57.95 |
| 2 | 600.65 | 1187.16 | 55.04 | 55.03 |
| 3 | 600.63 | 1195.31 | 56.52 | 56.17 |
| 4 | 598.77 | 1188.46 | 59.33 | 53.58 |
| 5 | 610.34 | 1198.44 | 57.06 | 45.62 |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------------|-----------|---------|---------|-------|
| Počet zkoušek | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Průměrná hodnota | 601.65 | 1192.15 | 57.29 | 53.67 |
| Směrodatná odchylka | 5.01 | 4.71 | 1.68 | 4.77 |
| Minimální hodnota | 597.85 | 1187.16 | 55.04 | 45.62 |
| Maximální hodnota | 610.34 | 1198.44 | 59.33 | 57.95 |





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

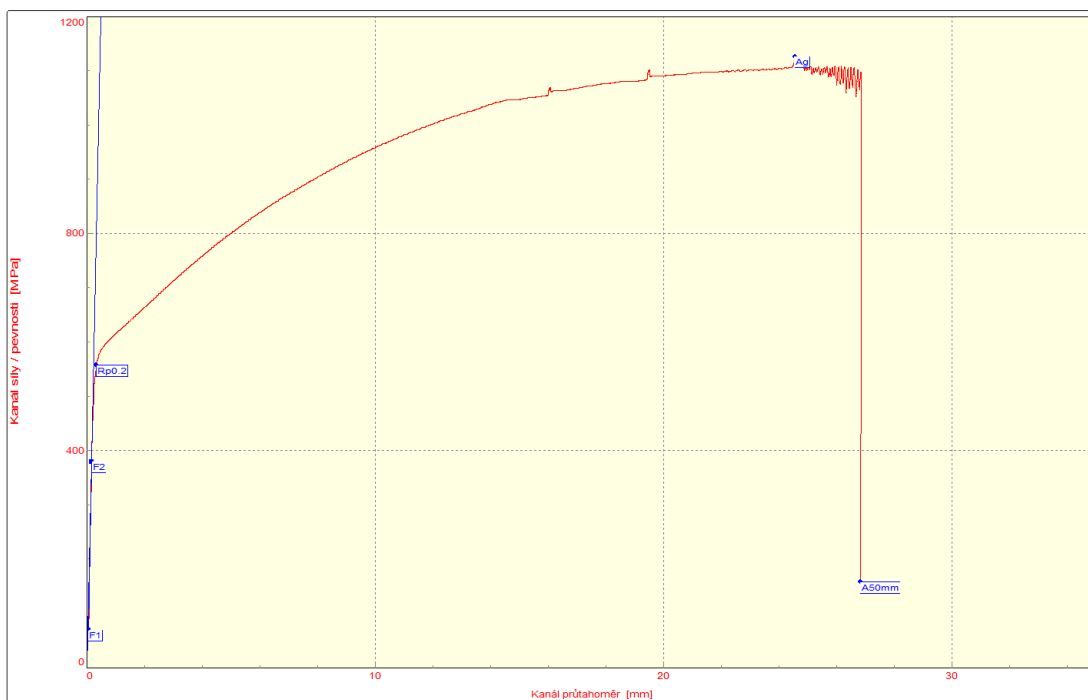
Testovaný materiál: : TWIP 1200
Norma: : ČSN EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Jiří Sobotka

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 0°
Datum zkoušky: : 13.4.2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------|-----------|---------|---------|-------|
| 1 | 567.19 | 1118.65 | 55.02 | 46.77 |
| 2 | 557.19 | 1125.77 | 56.42 | 48.23 |
| 3 | 556.46 | 1125.27 | 60.69 | 46.21 |
| 4 | 558.63 | 1131.77 | 57.25 | 43.38 |
| 5 | 554.47 | 1126.37 | 61.34 | 58.23 |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------------|-----------|---------|---------|-------|
| Počet zkoušek | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Průměrná hodnota | 558.79 | 1125.57 | 58.14 | 48.56 |
| Směrodatná odchylka | 4.93 | 4.67 | 2.75 | 5.68 |
| Minimální hodnota | 554.47 | 1118.65 | 55.02 | 43.38 |
| Maximální hodnota | 567.19 | 1131.77 | 61.34 | 58.23 |





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

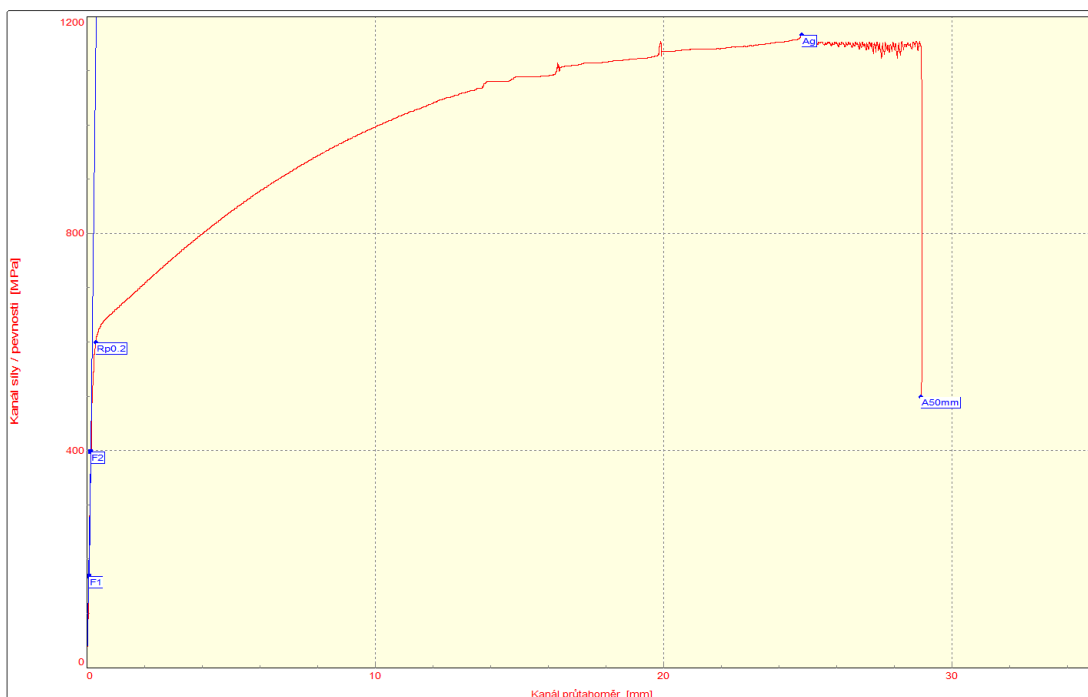
Testovaný materiál: : TWIP 1200
Norma: : ČSN EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Jiří Sobotka

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 45°
Datum zkoušky: : 4.4.2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------|-----------|---------|---------|-------|
| 1 | 585.08 | 1143.10 | 62.81 | 53.59 |
| 2 | 584.67 | 1135.95 | 62.37 | 58.86 |
| 3 | 598.47 | 1165.22 | 57.51 | 48.77 |
| 4 | 586.10 | 1154.97 | 61.64 | 61.13 |
| 5 | 573.12 | 1149.61 | 56.69 | 49.79 |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------------|-----------|---------|---------|-------|
| Počet zkoušek | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Průměrná hodnota | 585.49 | 1149.77 | 60.20 | 54.42 |
| Směrodatná odchylka | 8.98 | 11.19 | 2.88 | 5.45 |
| Minimální hodnota | 573.12 | 1135.95 | 56.69 | 48.77 |
| Maximální hodnota | 598.47 | 1165.22 | 62.81 | 61.13 |





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

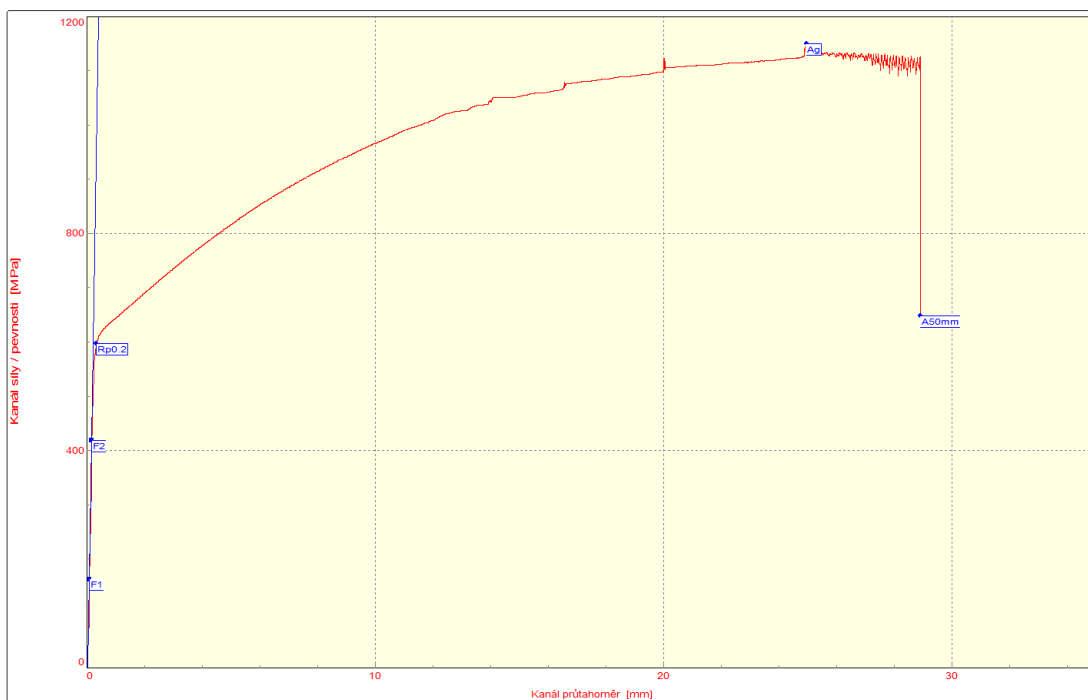
Testovaný materiál: : TWIP 1200
Norma: : ČSN EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Jiří Sobotka

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 90°
Datum zkoušky: : 16.4.2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------|-----------|---------|---------|-------|
| 1 | 595.73 | 1156.40 | 54.72 | 46.85 |
| 2 | 597.67 | 1150.09 | 57.30 | 49.02 |
| 3 | 598.72 | 1149.62 | 55.21 | 49.19 |
| 4 | 605.10 | 1168.30 | 59.48 | 56.52 |
| 5 | 592.60 | 1154.55 | 58.54 | 57.98 |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------------|-----------|---------|---------|-------|
| Počet zkoušek | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Průměrná hodnota | 597.96 | 1155.79 | 57.05 | 53.42 |
| Směrodatná odchylka | 4.62 | 7.57 | 2.06 | 7.31 |
| Minimální hodnota | 592.60 | 1149.62 | 54.72 | 46.85 |
| Maximální hodnota | 605.10 | 1168.30 | 59.48 | 57.98 |





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

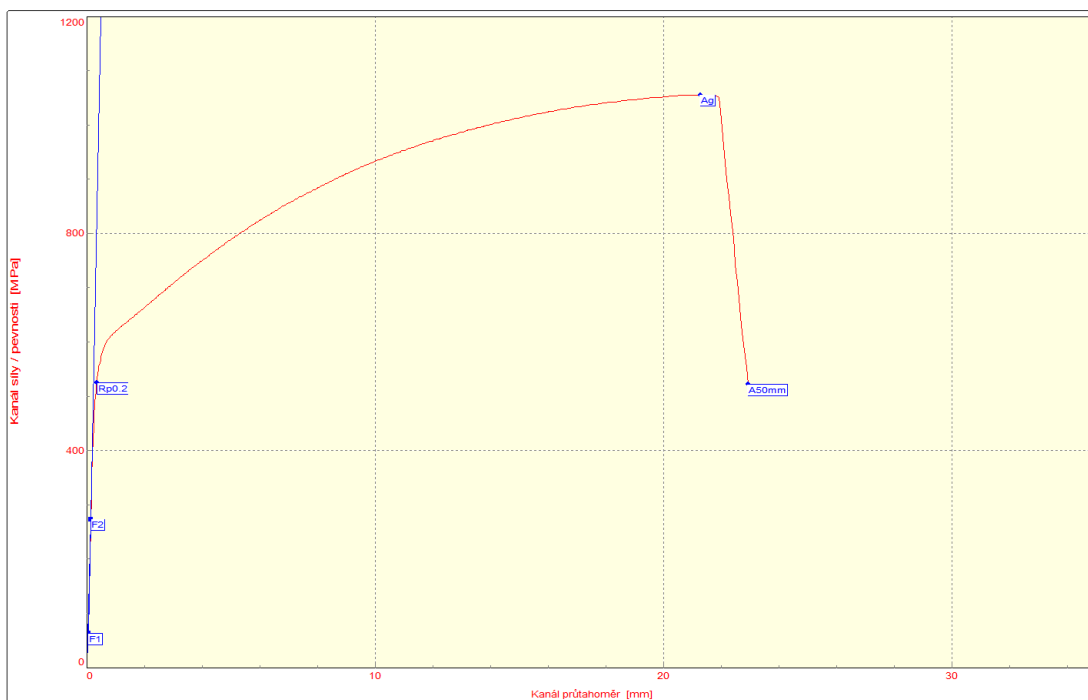
Testovaný materiál: : TWIP 1200
Norma: : ČSN EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Jiří Sobotka

Rychlost zatěžování: : 600 mm/min
Směr odebrání vzorku: : 0°
Datum zkoušky: : 14.4.2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------|-----------|---------|---------|-------|
| 1 | 519.99 | 1055.98 | 47.51 | 42.56 |
| 2 | 525.64 | 1054.71 | 45.39 | 41.62 |
| 3 | 528.25 | 1054.98 | 49.31 | 42.42 |
| 4 | 522.84 | 1046.66 | 46.85 | 42.28 |
| 5 | 530.79 | 1052.47 | 49.42 | 42.66 |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------------|-----------|---------|---------|-------|
| Počet zkoušek | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Průměrná hodnota | 525.50 | 1052.96 | 47.69 | 42.31 |
| Směrodatná odchylka | 4.27 | 3.75 | 1.71 | 0.41 |
| Minimální hodnota | 519.99 | 1046.66 | 45.39 | 41.62 |
| Maximální hodnota | 530.79 | 1055.98 | 49.42 | 42.66 |





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

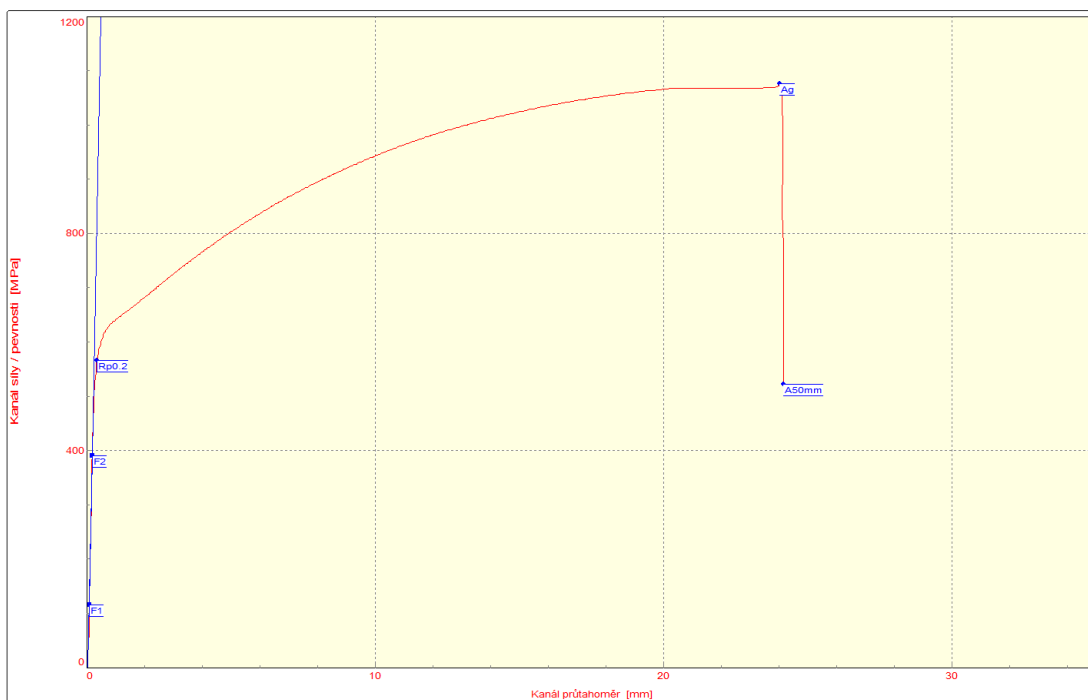
Testovaný materiál: : TWIP 1200
Norma: : ČSN EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Jiří Sobotka

Rychlost zatěžování: : 600 mm/min
Směr odebrání vzorku : 45°
Datum zkoušky: : 16.4.2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------|-----------|---------|---------|-------|
| 1 | 560.67 | 1069.47 | 52.28 | 41.98 |
| 2 | 565.99 | 1075.29 | 47.88 | 47.18 |
| 3 | 559.87 | 1083.55 | 51.27 | 47.29 |
| 4 | 559.32 | 1071.97 | 50.52 | 41.65 |
| 5 | 558.85 | 1065.99 | 48.83 | 41.49 |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------------|-----------|---------|---------|-------|
| Počet zkoušek | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Průměrná hodnota | 560.94 | 1073.25 | 50.15 | 43.92 |
| Směrodatná odchylka | 2.90 | 6.69 | 1.79 | 3.03 |
| Minimální hodnota | 558.85 | 1065.99 | 47.88 | 41.49 |
| Maximální hodnota | 565.99 | 1083.55 | 52.28 | 47.29 |





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

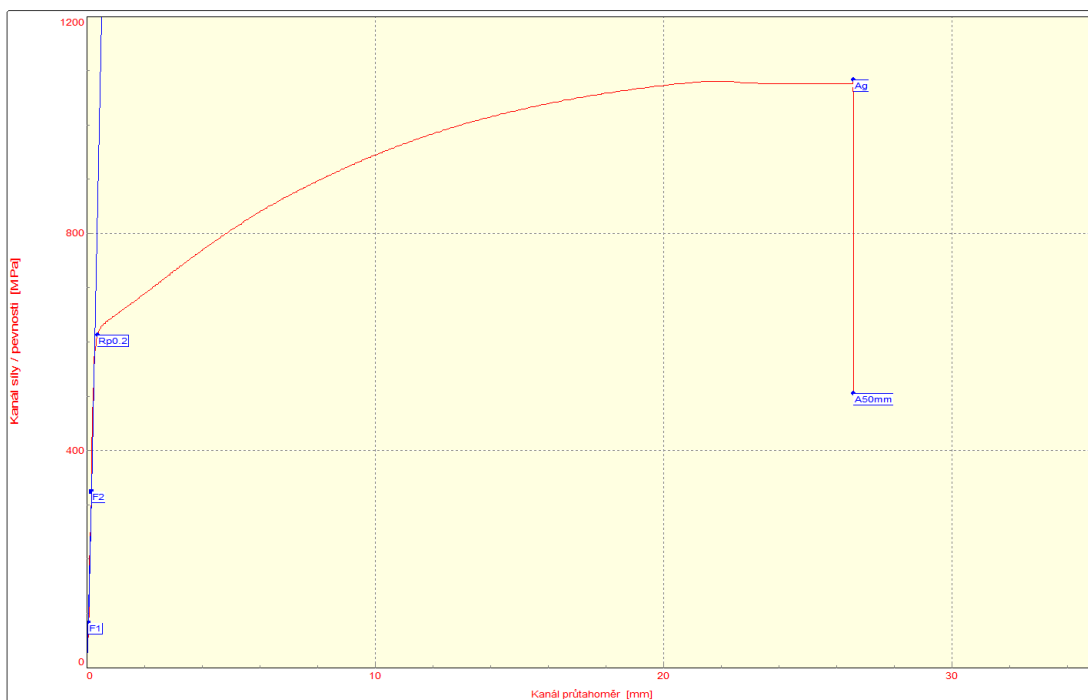
Testovaný materiál: : TWIP 1200
Norma: : ČSN EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Jiří Sobotka

Rychlost zatěžování: : 600 mm/min
Směr odebrání vzorku : 90°
Datum zkoušky: : 14.4.2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------|-----------|---------|---------|-------|
| 1 | 608.90 | 1084.33 | 52.74 | 52.38 |
| 2 | 611.75 | 1085.14 | 53.65 | 44.42 |
| 3 | 607.20 | 1084.26 | 52.04 | 50.70 |
| 4 | 614.18 | 1088.75 | 52.12 | 44.27 |
| 5 | 612.25 | 1083.02 | 52.73 | 52.27 |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------------|-----------|---------|---------|-------|
| Počet zkoušek | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Průměrná hodnota | 610.85 | 1085.10 | 52.66 | 48.81 |
| Směrodatná odchylka | 2.78 | 2.18 | 0.65 | 4.13 |
| Minimální hodnota | 607.20 | 1083.02 | 52.04 | 44.27 |
| Maximální hodnota | 614.18 | 1088.75 | 53.65 | 52.38 |





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

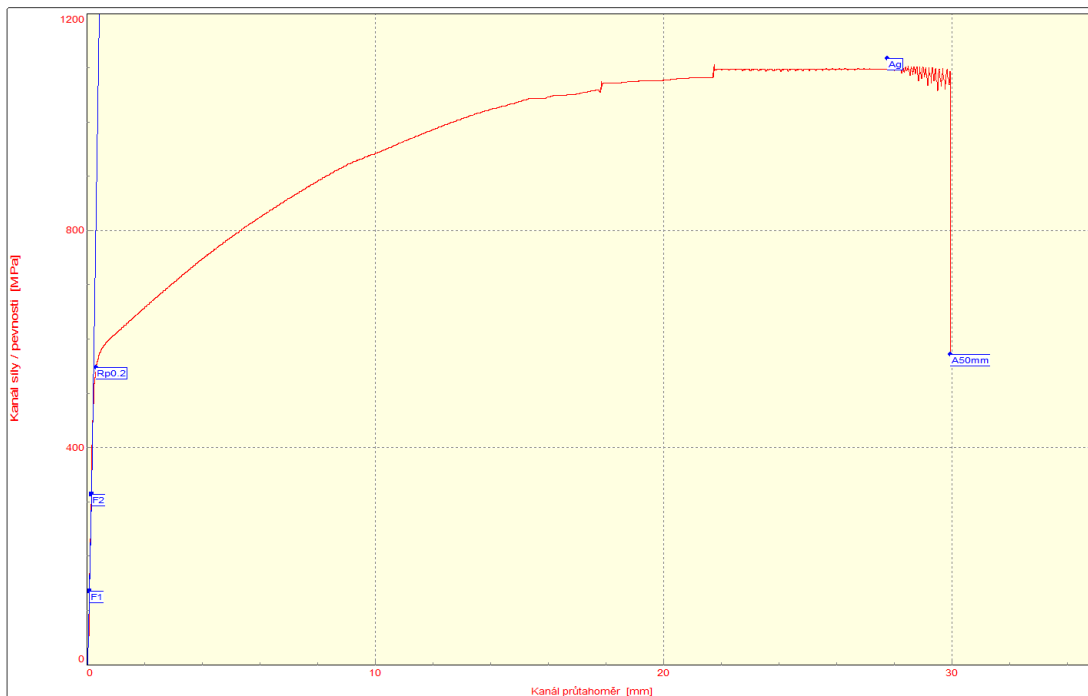
Testovaný materiál: : TWIP 1200
Norma: : ČSN EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Jiří Sobotka

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 0°
Datum zkoušky: : 16.7.2008
Podmínky měření : BH0

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------|-----------|---------|---------|-------|
| 1 | 554.19 | 1123.67 | 60.35 | 45.13 |
| 2 | 561.15 | 1109.96 | 59.14 | 57.93 |
| 3 | 547.05 | 1116.86 | 59.43 | 54.72 |
| 4 | 546.22 | 1103.55 | 59.56 | 59.24 |
| 5 | 558.35 | 1124.62 | 58.46 | 50.88 |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------------|-----------|---------|---------|-------|
| Počet zkoušek | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Průměrná hodnota | 553.39 | 1115.73 | 59.39 | 53.58 |
| Směrodatná odchylka | 6.65 | 9.01 | 0.69 | 5.72 |
| Minimální hodnota | 546.22 | 1103.55 | 58.46 | 45.13 |
| Maximální hodnota | 561.15 | 1124.62 | 60.35 | 59.24 |





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

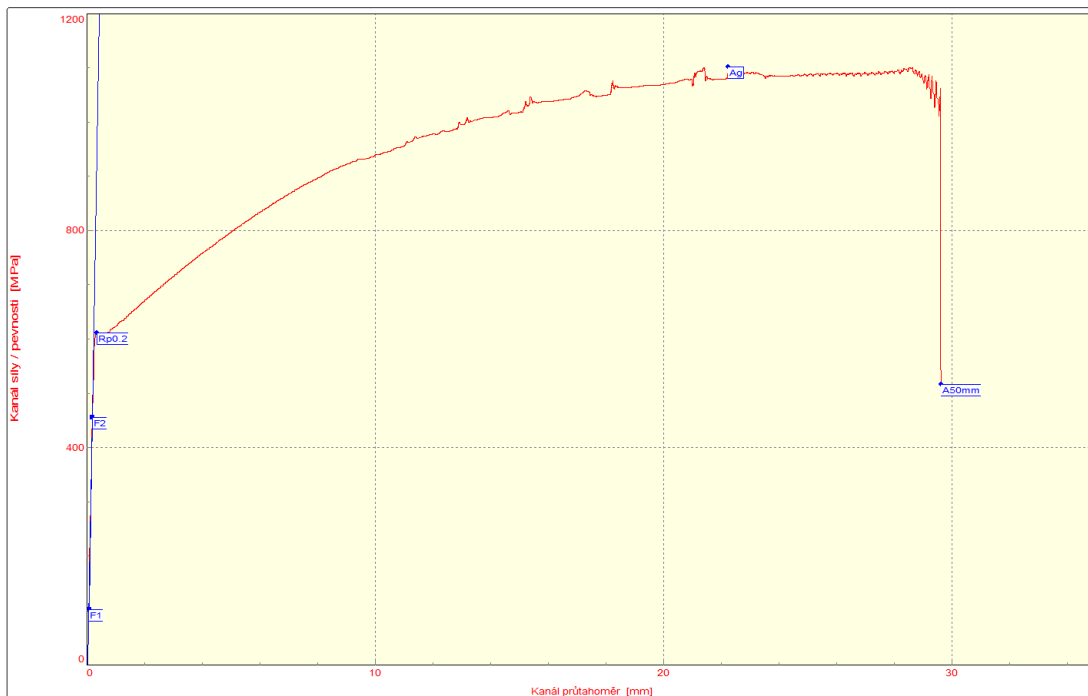
Testovaný materiál: : TWIP 1200
Norma: : ČSN EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Jiří Sobotka

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 0°
Datum zkoušky: : 16.7.2008
Podmínky měření : BH1

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------|-----------|---------|---------|-------|
| 1 | 625.57 | 1130.57 | 57.74 | 57.41 |
| 2 | 622.27 | 1122.33 | 58.52 | 51.27 |
| 3 | 614.65 | 1114.70 | 56.96 | 49.02 |
| 4 | 615.46 | 1097.26 | 57.36 | 41.48 |
| 5 | 611.27 | 1101.23 | 58.79 | 43.66 |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------------|-----------|---------|---------|-------|
| Počet zkoušek | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Průměrná hodnota | 617.84 | 1113.22 | 57.87 | 50.21 |
| Směrodatná odchylka | 5.88 | 14.01 | 0.77 | 8.04 |
| Minimální hodnota | 611.27 | 1097.26 | 56.96 | 41.48 |
| Maximální hodnota | 625.57 | 1130.57 | 58.79 | 57.41 |





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

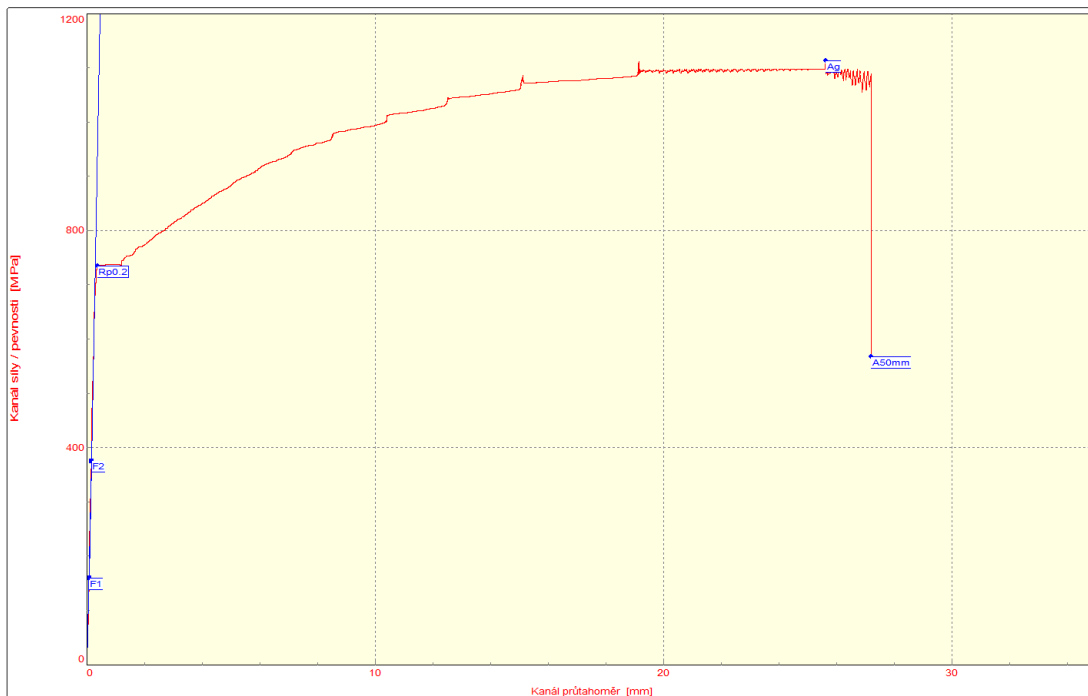
Testovaný materiál: : TWIP 1200
Norma: : ČSN EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Jiří Sobotka

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 0°
Datum zkoušky: : 16.7.2008
Podmínky měření : BH5

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------|-----------|---------|---------|-------|
| 1 | 726.23 | 1117.30 | 54.14 | 44.82 |
| 2 | 730.75 | 1113.38 | 52.54 | 36.80 |
| 3 | 731.25 | 1111.14 | 53.88 | 47.59 |
| 4 | 737.46 | 1128.88 | 53.83 | 48.04 |
| 5 | 734.33 | 1112.89 | 53.98 | 50.43 |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % | Ag % |
|---------------------|-----------|---------|---------|-------|
| Počet zkoušek | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Průměrná hodnota | 732.01 | 1116.72 | 53.67 | 45.53 |
| Směrodatná odchylka | 4.20 | 7.16 | 0.64 | 5.27 |
| Minimální hodnota | 726.23 | 1111.14 | 52.54 | 36.80 |
| Maximální hodnota | 737.46 | 1128.88 | 54.14 | 50.43 |





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

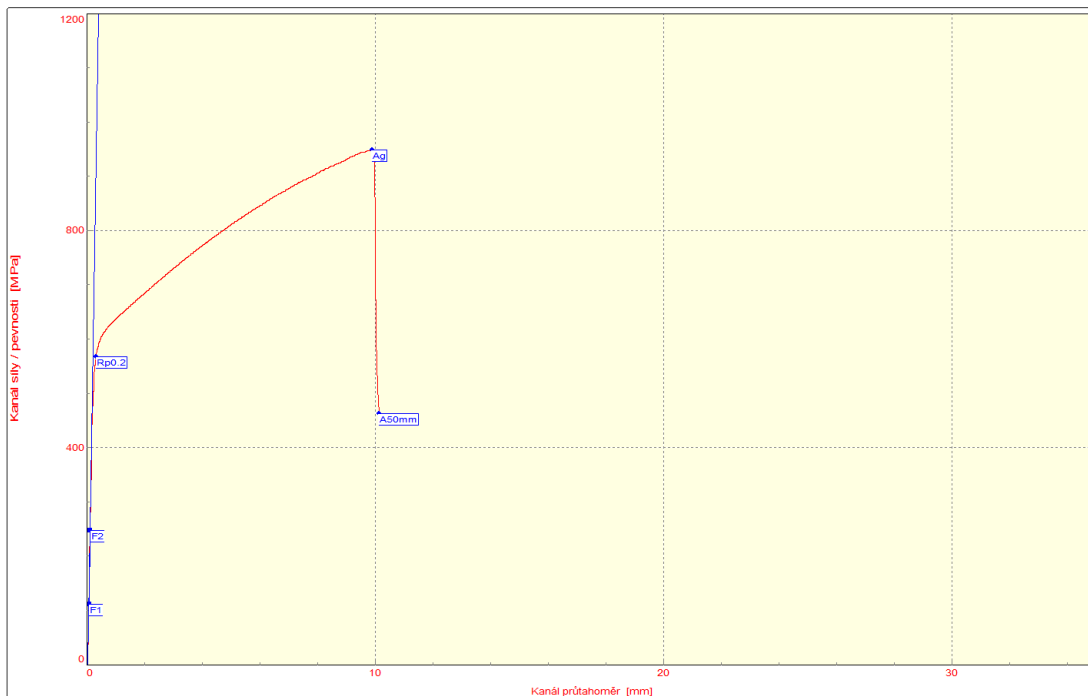
Testovaný materiál: : TWIP 1200
Norma: : ČSN EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Jiří Sobotka

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 0°
Datum zkoušky: : 5.8.2008
Výroba vzorku: : Stříhání

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------|-----------|--------|---------|
| 1 | 564.95 | 965.82 | 20.31 |
| 2 | 554.89 | 959.37 | 20.84 |
| 3 | 564.86 | 967.97 | 20.74 |
| 4 | 562.78 | 961.60 | 21.08 |
| 5 | 567.75 | 947.79 | 19.89 |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------------|-----------|--------|---------|
| Počet zkoušek | 5 | 5 | 5 |
| Průměrná hodnota | 563.05 | 960.51 | 20.57 |
| Směrodatná odchylka | 4.89 | 7.88 | 0.47 |
| Minimální hodnota | 554.89 | 947.79 | 19.89 |
| Maximální hodnota | 567.75 | 967.97 | 21.08 |





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

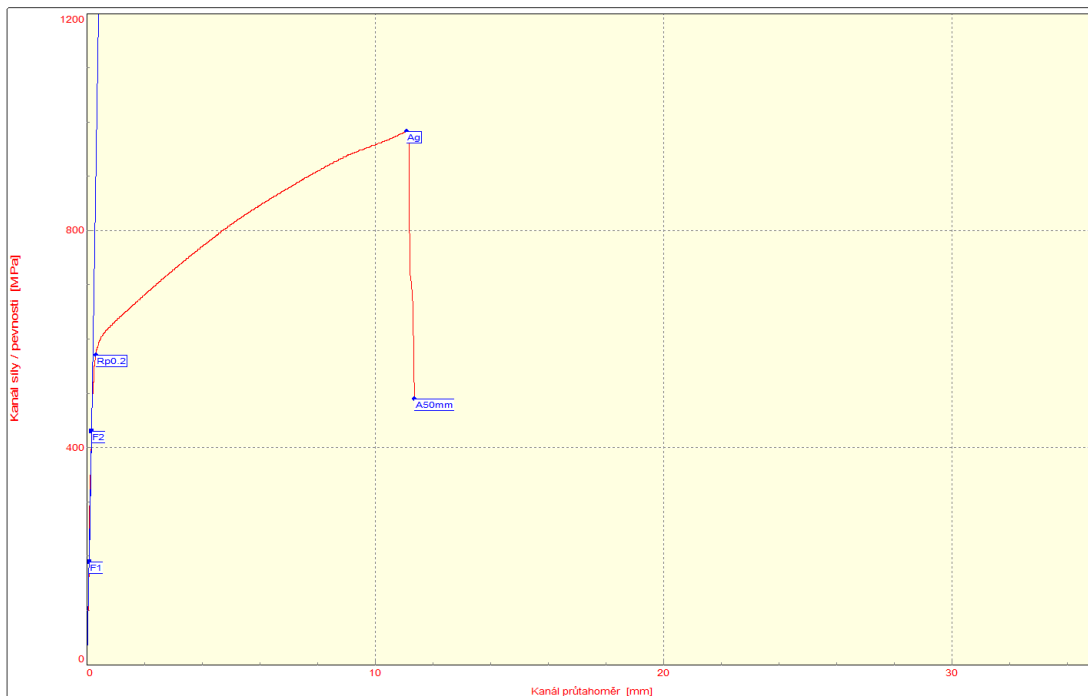
Testovaný materiál: : TWIP 1200
Norma: : ČSN EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Jiří Sobotka

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku : 0°
Datum zkoušky: : 11.8.2008
Výroba vzorku: : Frézování

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------|-----------|--------|---------|
| 1 | 564.79 | 977.15 | 22.37 |
| 2 | 568.62 | 982.95 | 24.68 |
| 3 | 566.77 | 975.42 | 21.88 |
| 4 | 570.46 | 981.78 | 23.66 |
| 5 | 569.96 | 982.07 | 24.06 |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------------|-----------|--------|---------|
| Počet zkoušek | 5 | 5 | 5 |
| Průměrná hodnota | 568.12 | 979.87 | 23.33 |
| Směrodatná odchylka | 2.35 | 3.36 | 1.17 |
| Minimální hodnota | 564.79 | 975.42 | 21.88 |
| Maximální hodnota | 570.46 | 982.95 | 24.68 |





STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Oddělení tváření kovů a plastů
Katedra strojírenské technologie
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

VSTUPNÍ PARAMETRY

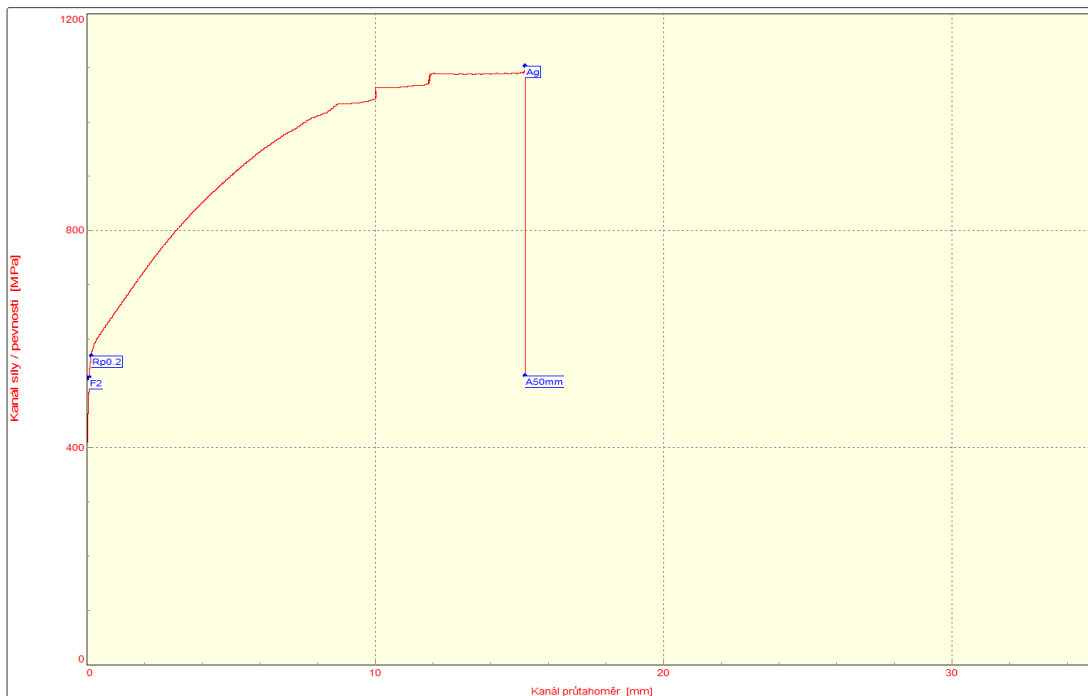
Testovaný materiál: : TWIP 1200
Norma: : ČSN EN 10002-1
Vypracoval: : Ing. Jiří Sobotka

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min
Směr odebrání vzorku: : 0°
Datum zkoušky: : 11.8.2008
Výroba vzorku: : Broušení

VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------|-----------|---------|---------|
| 1 | 558.63 | 1107.57 | 50.46 |
| 2 | 561.06 | 1105.01 | 49.53 |
| 3 | 566.15 | 1111.45 | 52.43 |
| 4 | 559.22 | 1109.51 | 51.57 |
| 5 | 568.86 | 1103.09 | 48.80 |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A50mm % |
|---------------------|-----------|---------|---------|
| Počet zkoušek | 5 | 5 | 5 |
| Průměrná hodnota | 562.78 | 1107.33 | 50.56 |
| Směrodatná odchylka | 4.51 | 3.36 | 1.47 |
| Minimální hodnota | 558.63 | 1103.09 | 48.80 |
| Maximální hodnota | 568.86 | 1111.45 | 52.43 |



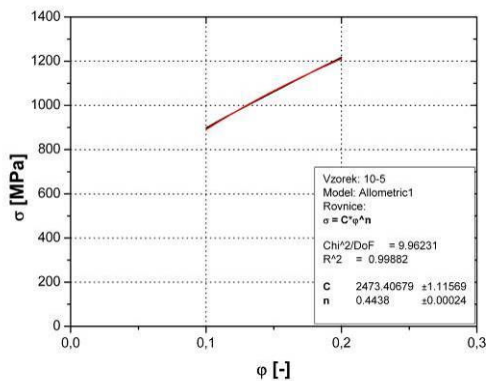
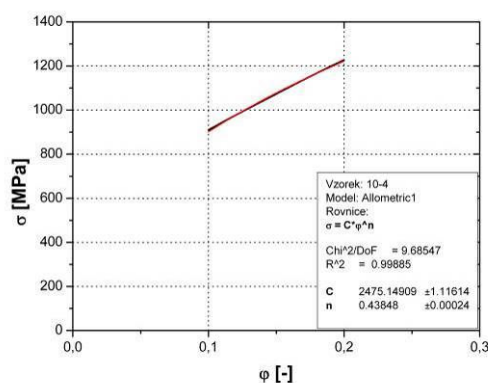
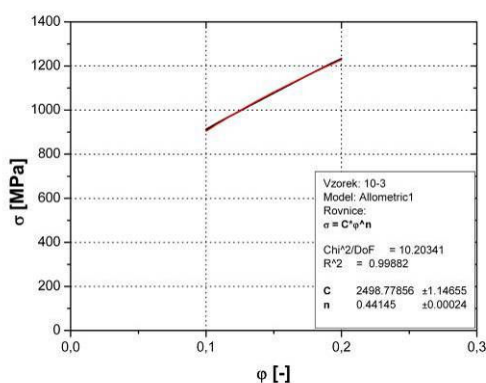
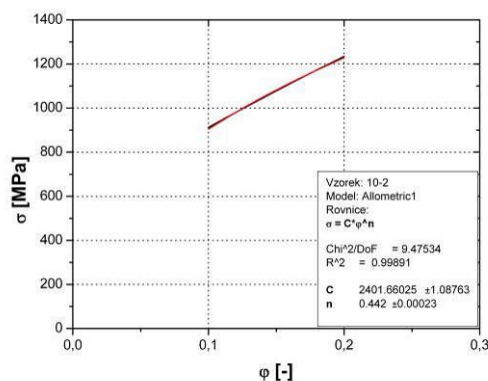
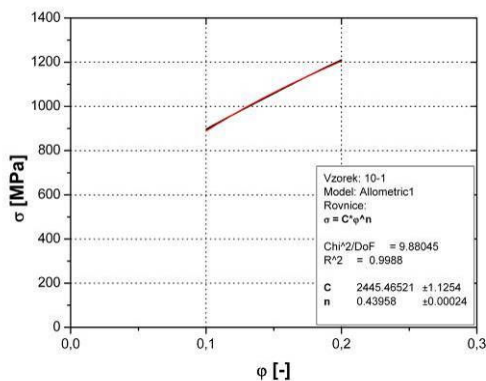


Grafy pro určení materiálových konstant C a n materiálu TWIP 1200

(Příloha č. 2)

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|-------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <10;20>\%$ | 1 mm/min | 0° |

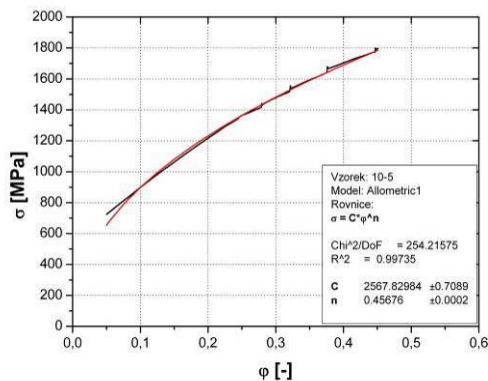
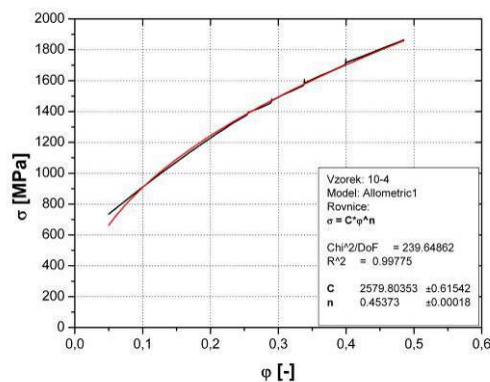
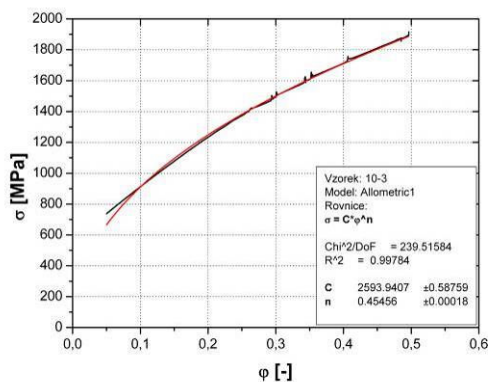
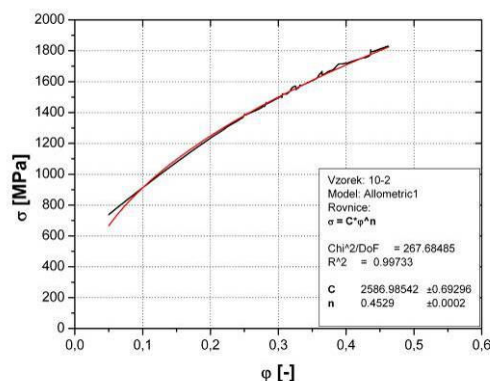
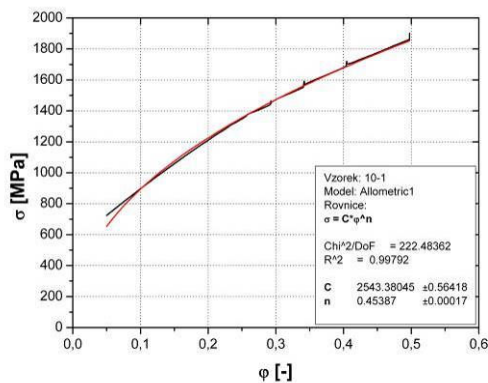


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|--------------|-----------------|--------------|
| 10-1 | 2445,465 | 0,440 |
| 10-2 | 2401,660 | 0,442 |
| 10-3 | 2498,779 | 0,441 |
| 10-4 | 2475,149 | 0,438 |
| 10-5 | 2473,407 | 0,444 |
| □ | 2458,892 | 0,441 |
| s | 37,154 | 0,002 |
| x_{\min} | 2401,660 | 0,438 |
| x_{\max} | 2498,779 | 0,444 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|--------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <5\%; R_m>$ | 1 mm/min | 0° |



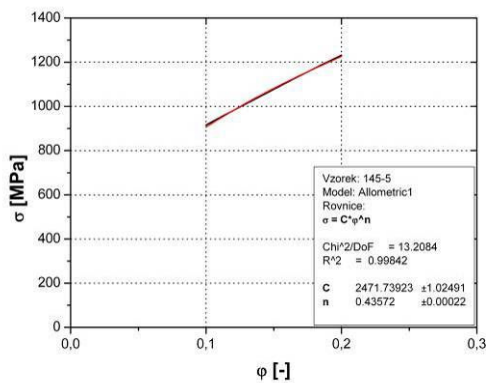
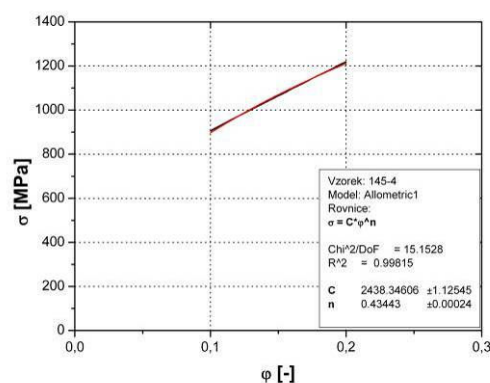
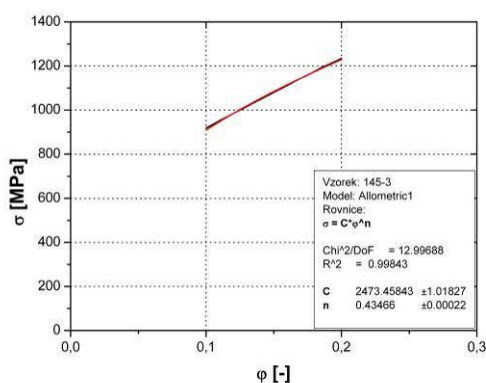
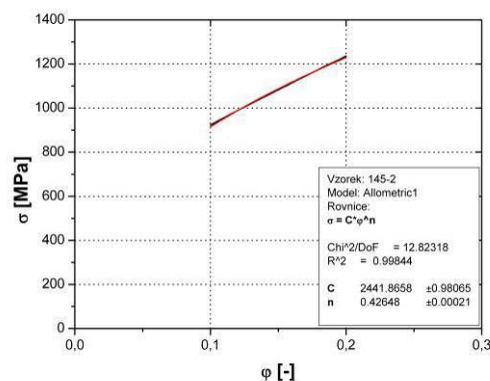
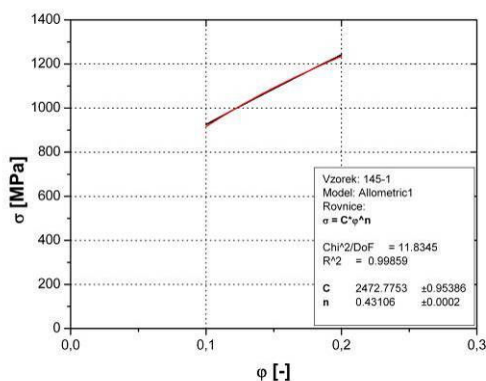
Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|------------------|-----------------|--------------|
| 10-1 | 2543,380 | 0,454 |
| 10-2 | 2586,985 | 0,453 |
| 10-3 | 2593,941 | 0,455 |
| 10-4 | 2579,804 | 0,454 |
| 10-5 | 2567,830 | 0,457 |
| □ | 2574,388 | 0,455 |
| s | 19,842 | 0,002 |
| X _{min} | 2543,380 | 0,453 |
| X _{max} | 2593,941 | 0,457 |



Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|-------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <10;20>\%$ | 1 mm/min | 45° |

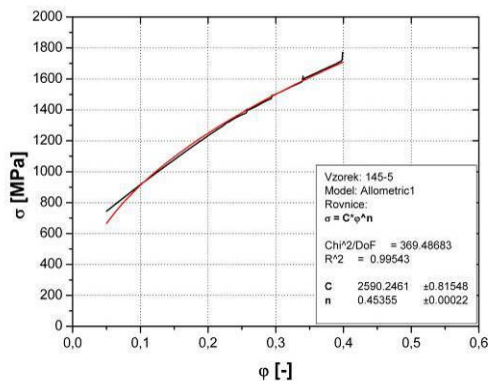
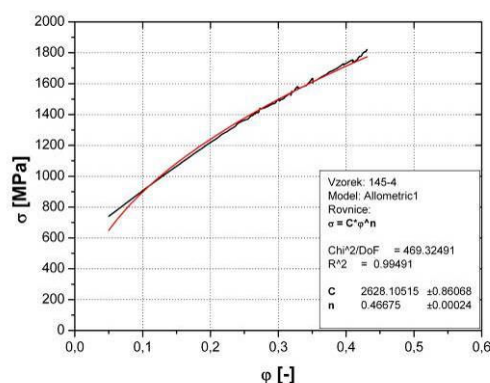
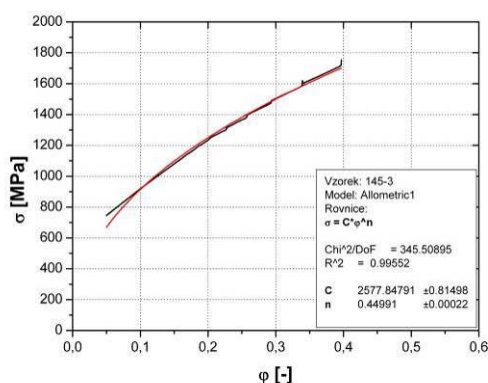
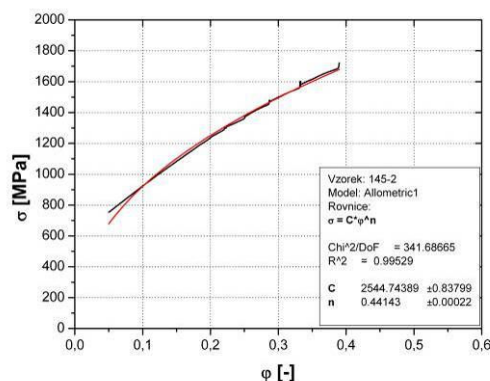
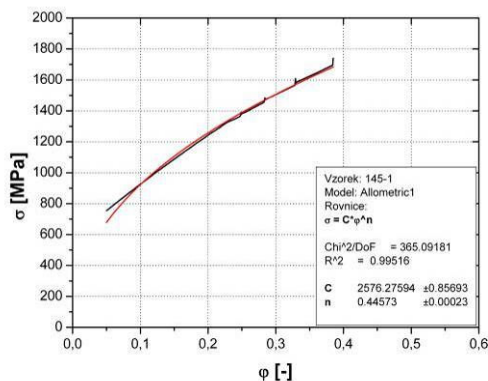


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|--------------|-----------------|--------------|
| 145-1 | 2472,775 | 0,431 |
| 145-2 | 2441,866 | 0,426 |
| 145-3 | 2473,458 | 0,435 |
| 145-4 | 2438,346 | 0,434 |
| 145-5 | 2471,739 | 0,436 |
| □ | 2459,637 | 0,432 |
| s | 17,883 | 0,004 |
| x_{\min} | 2438,346 | 0,426 |
| x_{\max} | 2473,458 | 0,436 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|--------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <5\%; R_m>$ | 1 mm/min | 45° |



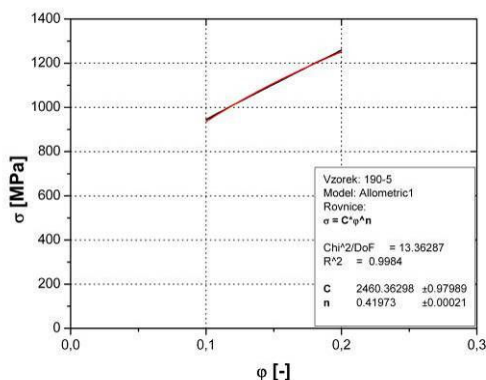
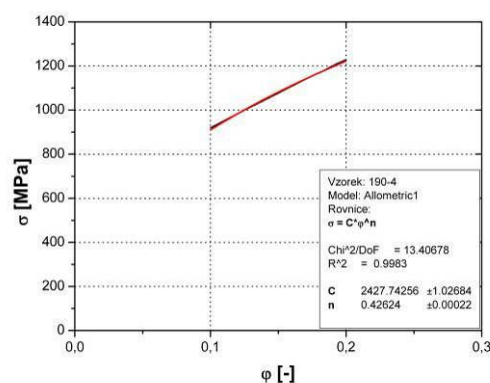
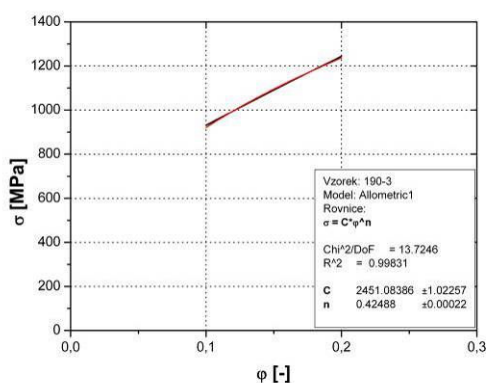
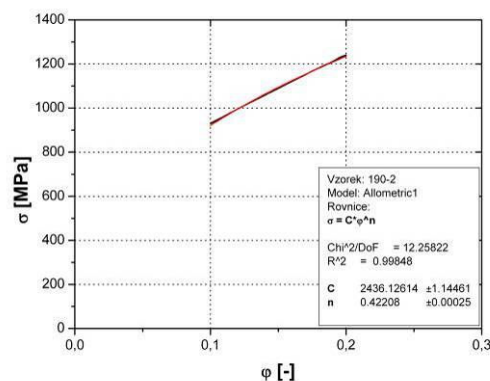
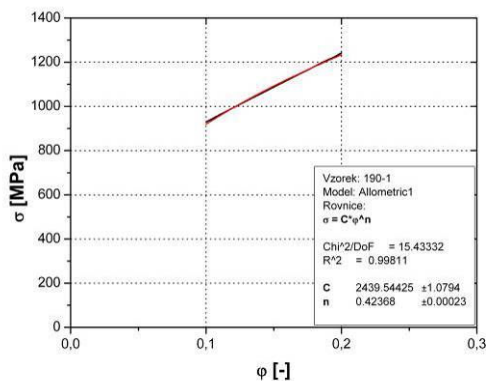
Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|--------------|-----------------|--------------|
| 145-1 | 2576,276 | 0,446 |
| 145-2 | 2544,744 | 0,441 |
| 145-3 | 2577,848 | 0,450 |
| 145-4 | 2628,105 | 0,467 |
| 145-5 | 2590,246 | 0,454 |
| □ | 2583,444 | 0,452 |
| s | 30,088 | 0,006 |
| x_{min} | 2544,744 | 0,441 |
| x_{max} | 2628,105 | 0,467 |



Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|-------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <10;20>\%$ | 1 mm/min | 90° |

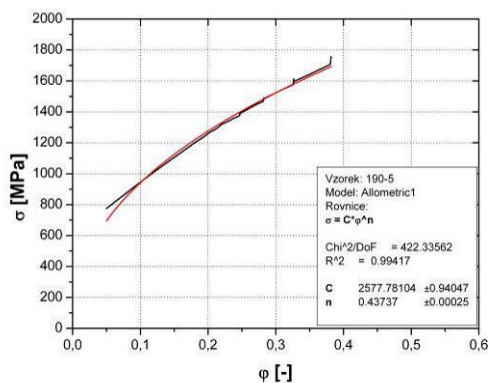
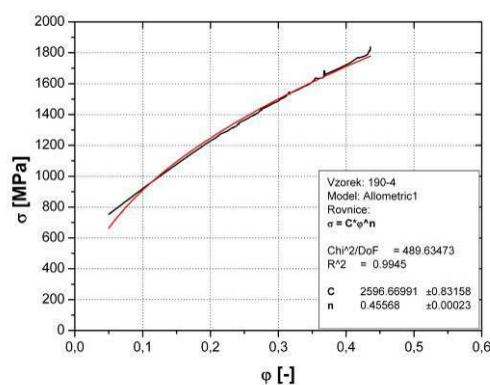
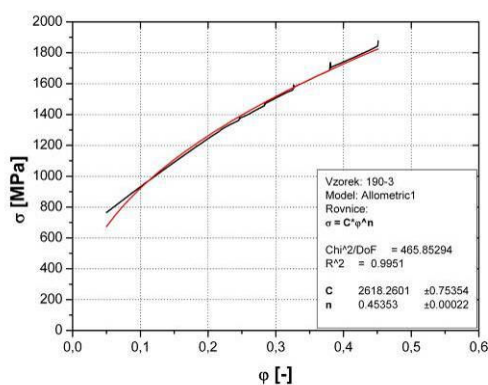
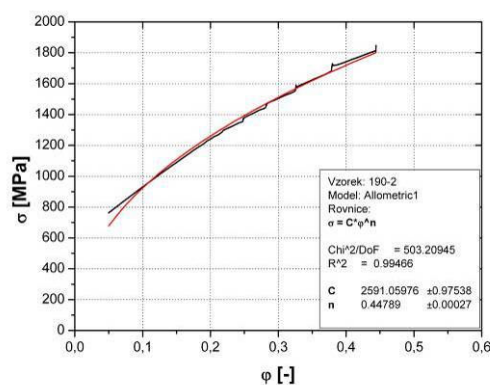
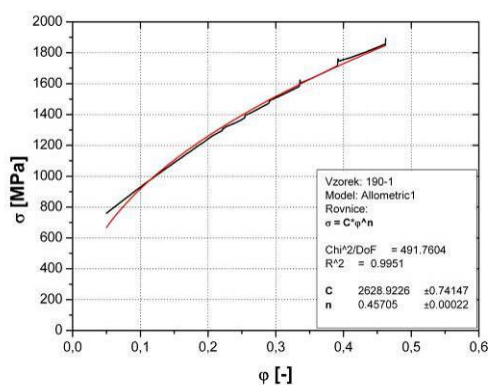


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|--------------|-----------------|--------------|
| 190-1 | 2439,544 | 0,424 |
| 190-2 | 2436,126 | 0,422 |
| 190-3 | 2451,084 | 0,425 |
| 190-4 | 2427,743 | 0,426 |
| 190-5 | 2460,363 | 0,420 |
| □ | 2442,912 | 0,423 |
| s | 12,854 | 0,003 |
| x_{\min} | 2427,743 | 0,420 |
| x_{\max} | 2460,363 | 0,426 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|--------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <5\%; R_m>$ | 1 mm/min | 90° |

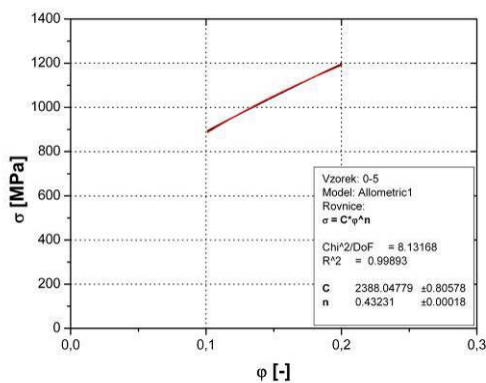
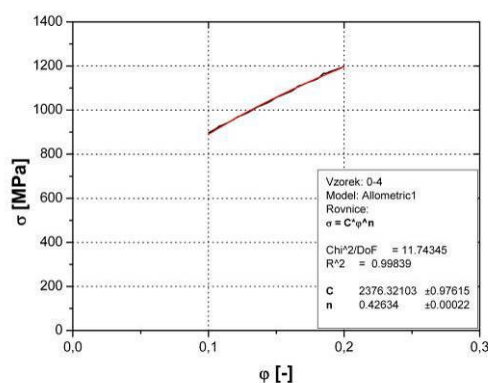
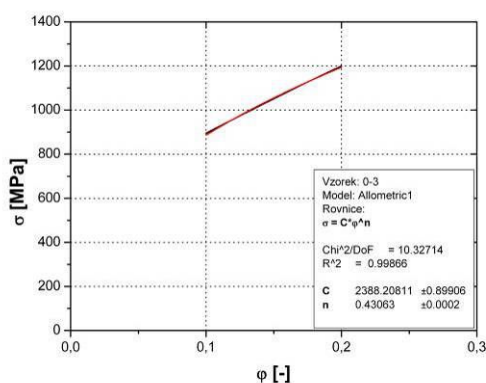
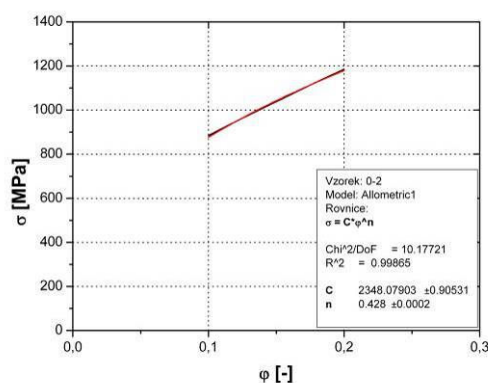
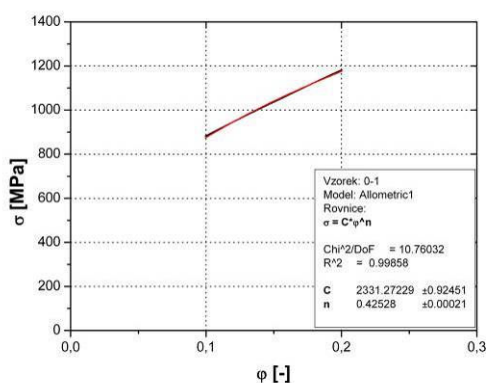


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|--------------|-----------------|--------------|
| 190-1 | 2628,923 | 0,457 |
| 190-2 | 2591,060 | 0,448 |
| 190-3 | 2618,260 | 0,454 |
| 190-4 | 2596,670 | 0,456 |
| 190-5 | 2577,781 | 0,437 |
| □ | 2602,539 | 0,450 |
| s | 20,751 | 0,008 |
| x_{min} | 2577,781 | 0,437 |
| x_{max} | 2628,923 | 0,457 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|-------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <10;20>\%$ | 10 mm/min | 0° |

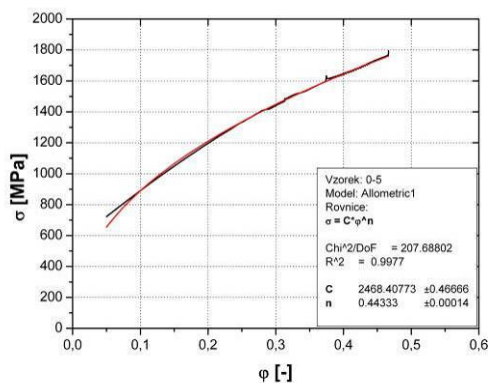
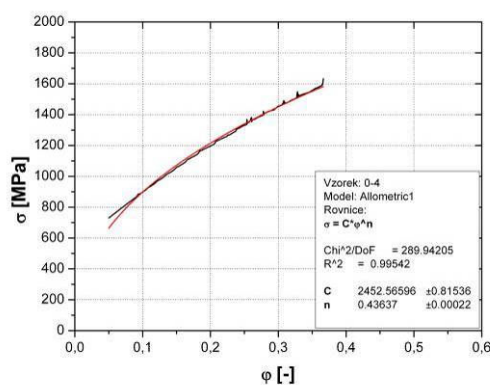
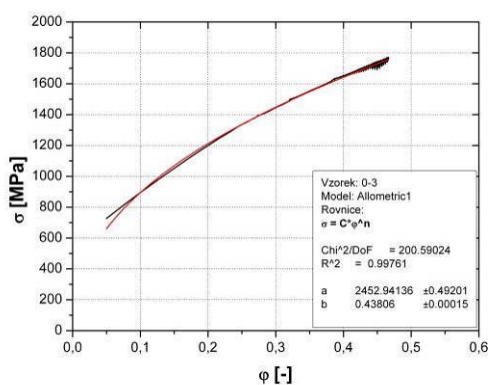
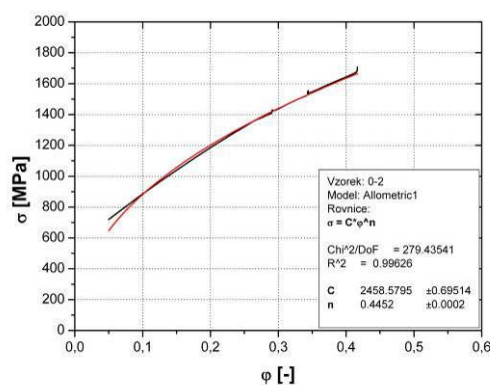
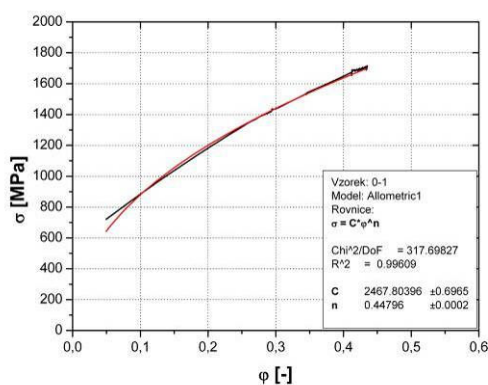


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|------------------|-----------------|--------------|
| 0-1 | 2331,272 | 0,425 |
| 0-2 | 2348,079 | 0,428 |
| 0-3 | 2388,208 | 0,431 |
| 0-4 | 2376,321 | 0,426 |
| 0-5 | 2388,048 | 0,432 |
| □ | 2366,386 | 0,428 |
| s | 25,555 | 0,003 |
| X _{min} | 2331,272 | 0,425 |
| X _{max} | 2388,208 | 0,432 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|--------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <5\%; R_m>$ | 10 mm/min | 0° |

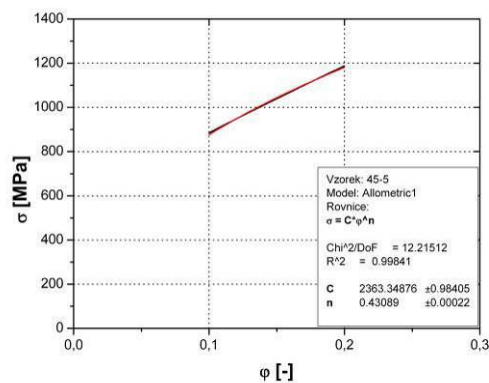
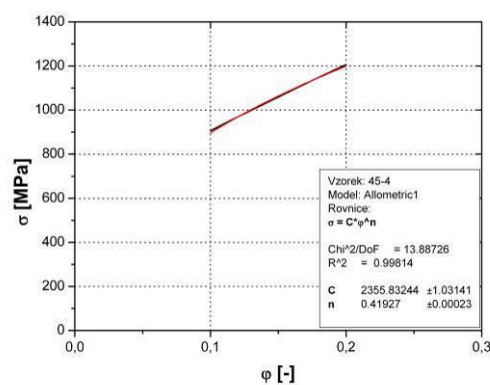
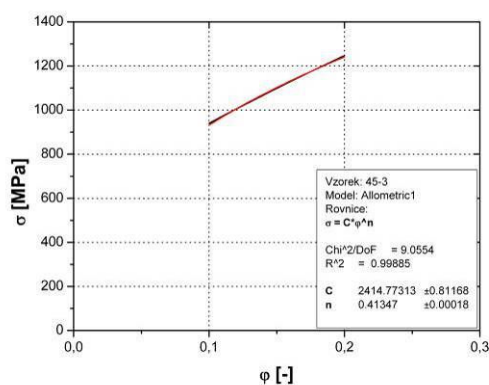
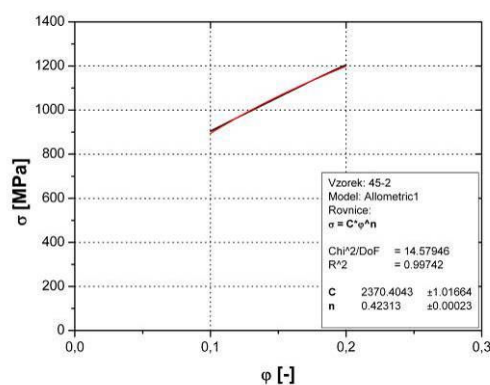
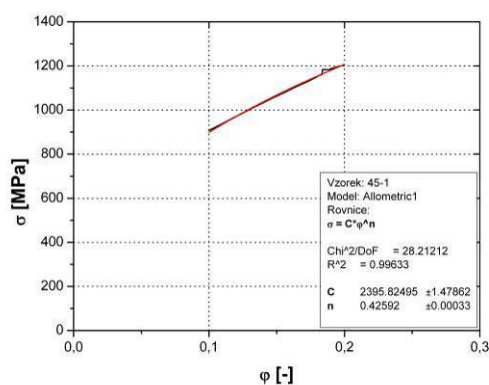


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|------------------|-----------------|--------------|
| 0-1 | 2467,804 | 0,448 |
| 0-2 | 2458,580 | 0,445 |
| 0-3 | 2452,941 | 0,438 |
| 0-4 | 2452,566 | 0,436 |
| 0-5 | 2468,408 | 0,443 |
| □ | 2460,120 | 0,442 |
| s | 7,807 | 0,005 |
| X _{min} | 2452,566 | 0,436 |
| X _{max} | 2468,408 | 0,448 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|-------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <10;20>\%$ | 10 mm/min | 45° |

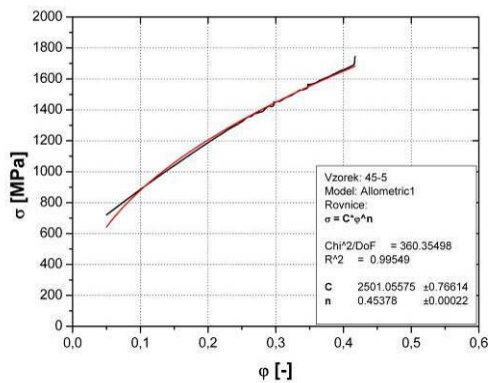
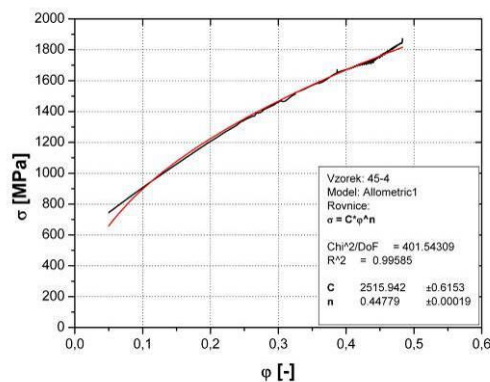
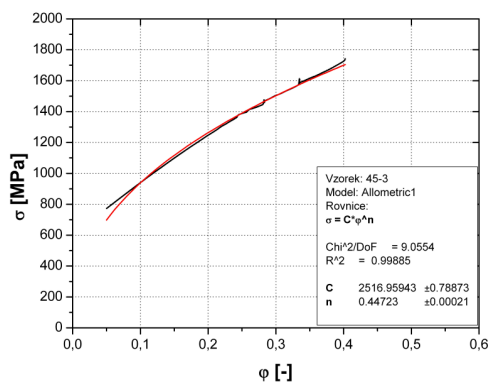
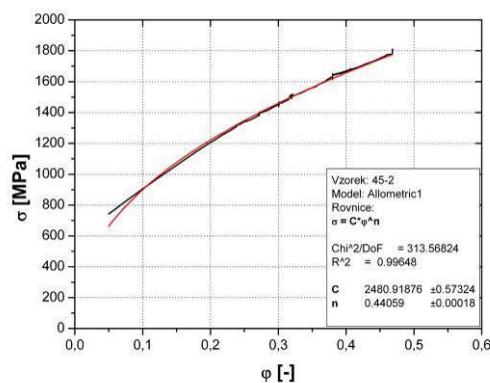
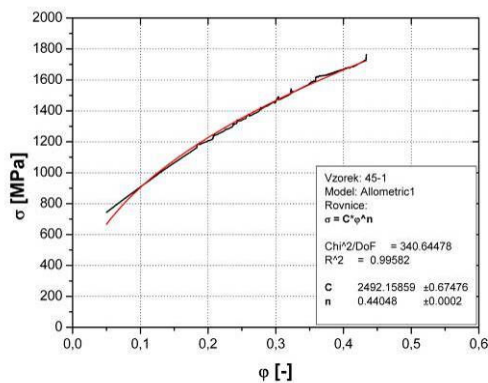


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|------------------|-----------------|--------------|
| 45-1 | 2395,825 | 0,426 |
| 45-2 | 2370,404 | 0,423 |
| 45-3 | 2414,773 | 0,413 |
| 45-4 | 2355,832 | 0,419 |
| 45-5 | 2363,349 | 0,431 |
| □ | 2380,037 | 0,422 |
| s | 24,561 | 0,007 |
| X _{min} | 2355,832 | 0,413 |
| X _{max} | 2414,773 | 0,431 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|--------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <5\%; R_m>$ | 10 mm/min | 45° |

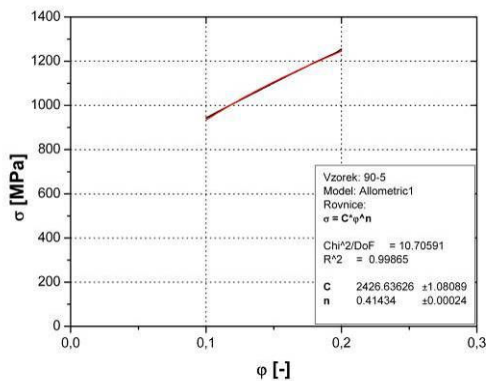
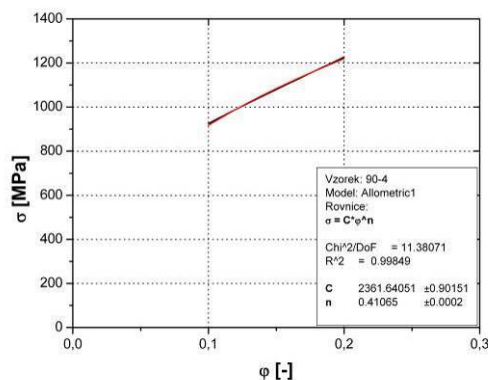
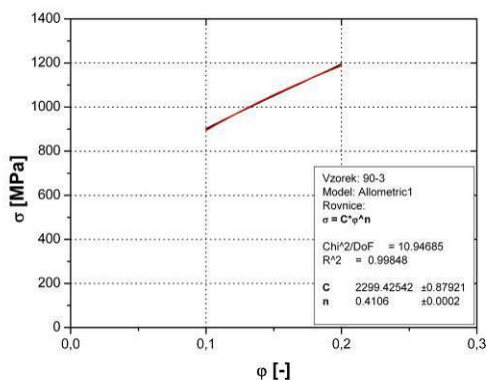
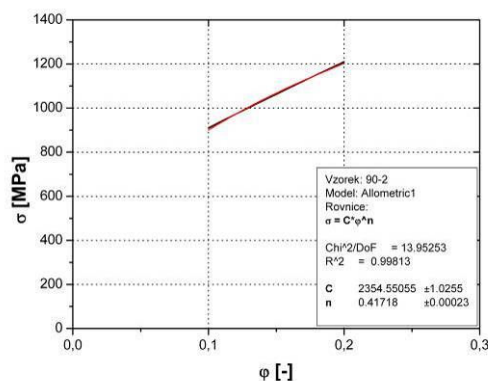
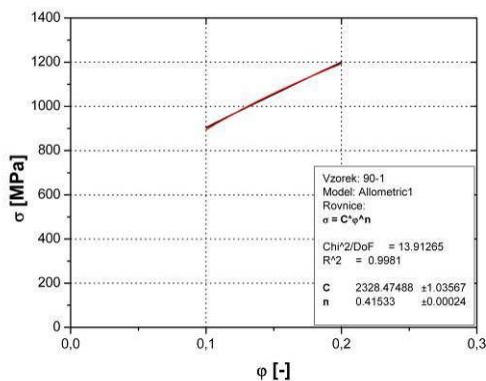


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|--------------|-----------------|--------------|
| 45-1 | 2492,159 | 0,440 |
| 45-2 | 2480,919 | 0,441 |
| 45-3 | 2516,959 | 0,447 |
| 45-4 | 2515,942 | 0,448 |
| 45-5 | 2501,056 | 0,454 |
| □ | 2501,407 | 0,446 |
| s | 15,480 | 0,003 |
| x_{\min} | 2480,919 | 0,440 |
| x_{\max} | 2516,959 | 0,454 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|-------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <10;20>\%$ | 10 mm/min | 90° |

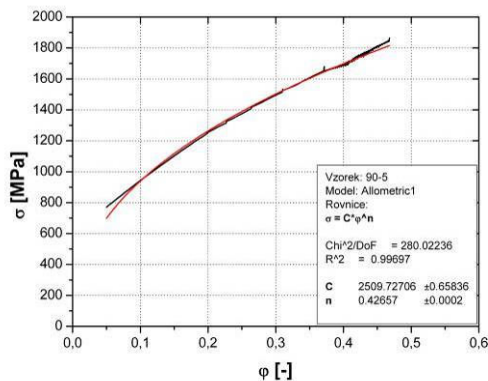
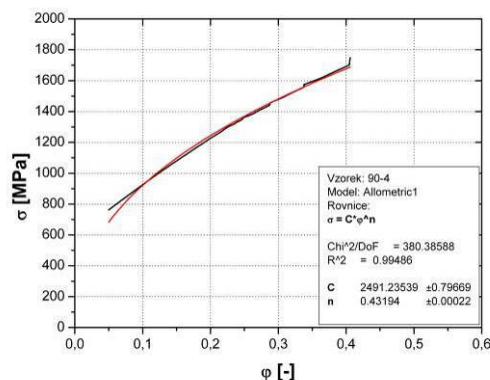
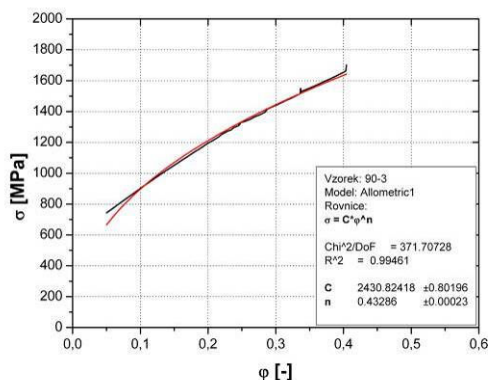
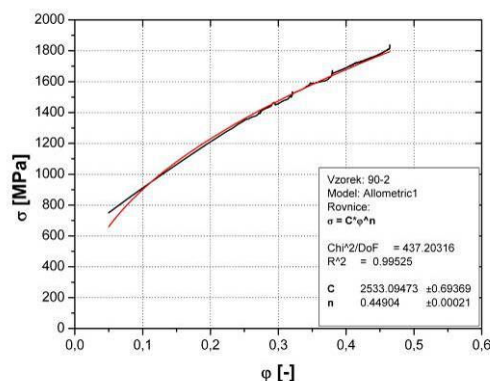
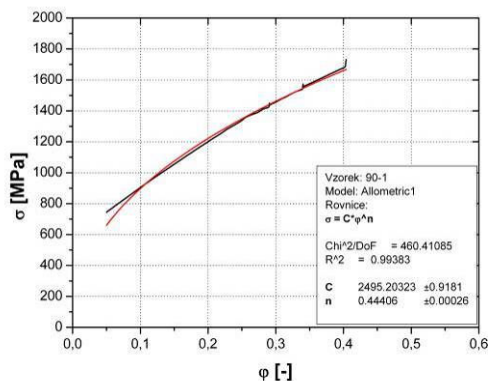


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|--------------|-----------------|--------------|
| 90-1 | 2328,475 | 0,415 |
| 90-2 | 2354,551 | 0,417 |
| 90-3 | 2299,425 | 0,411 |
| 90-4 | 2361,641 | 0,411 |
| 90-5 | 2426,636 | 0,414 |
| □ | 2354,146 | 0,414 |
| s | 47,340 | 0,003 |
| x_{\min} | 2299,425 | 0,411 |
| x_{\max} | 2426,636 | 0,417 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|--------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <5\%; R_m>$ | 10 mm/min | 90° |



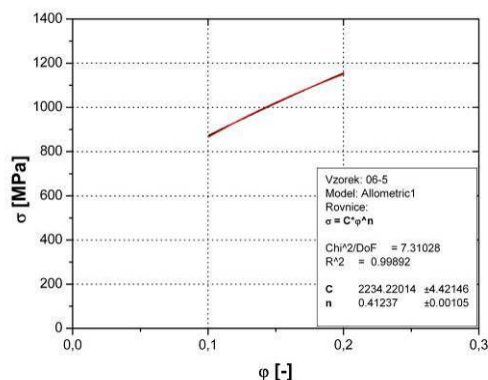
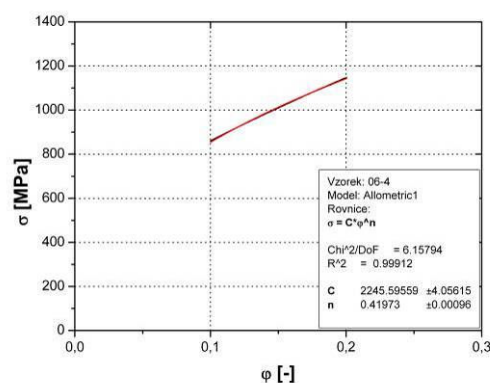
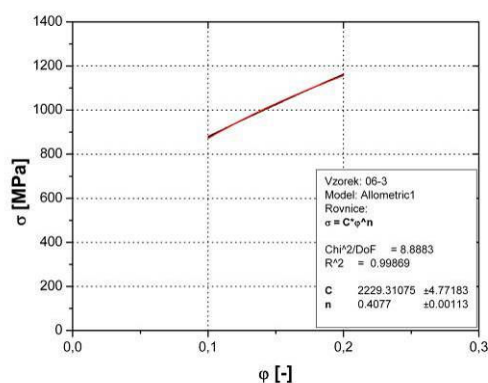
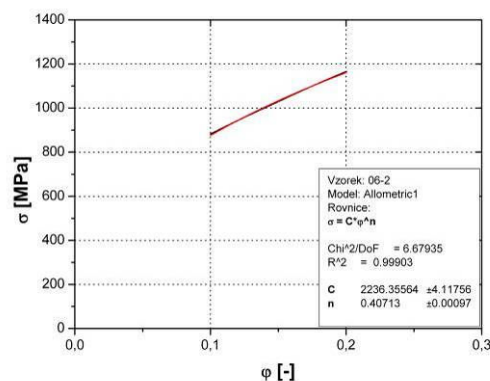
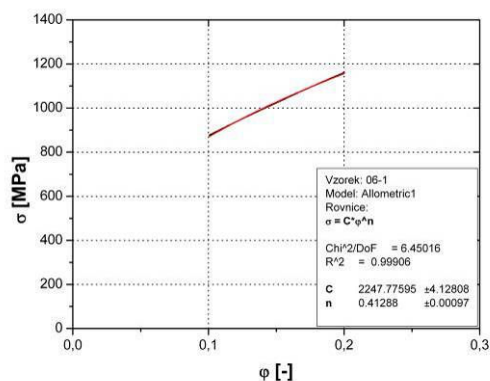
Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|--------------|-----------------|--------------|
| 90-1 | 2495,203 | 0,444 |
| 90-2 | 2533,095 | 0,449 |
| 90-3 | 2430,824 | 0,433 |
| 90-4 | 2491,235 | 0,432 |
| 90-5 | 2509,727 | 0,427 |
| □ | 2492,015 | 0,437 |
| s | 37,933 | 0,009 |
| x_{\min} | 2430,824 | 0,427 |
| x_{\max} | 2533,095 | 0,449 |



Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|-------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <10;20>\%$ | 600 mm/min | 0° |

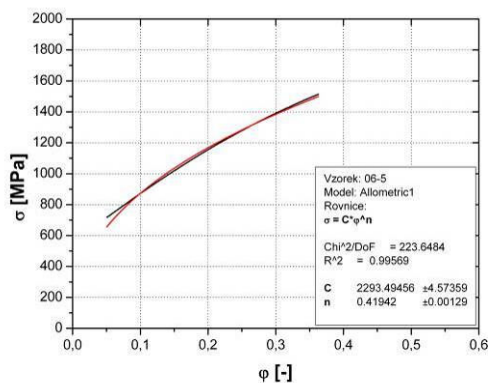
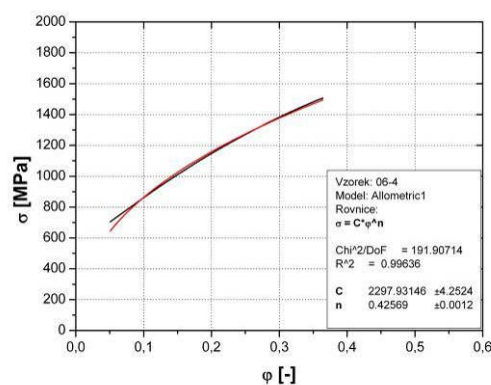
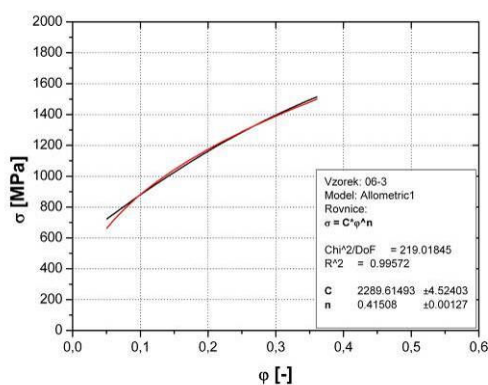
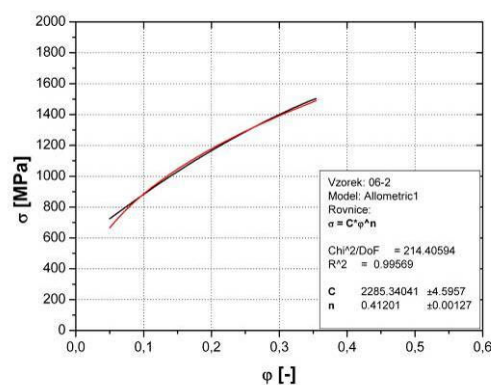
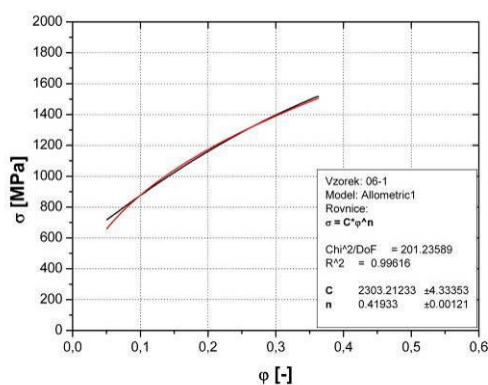


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|------------------|-----------------|--------------|
| 06-1 | 2247,776 | 0,413 |
| 06-2 | 2236,356 | 0,407 |
| 06-3 | 2229,311 | 0,408 |
| 06-4 | 2245,569 | 0,420 |
| 06-5 | 2234,220 | 0,412 |
| □ | 2238,652 | 0,412 |
| s | 7,804 | 0,005 |
| X _{min} | 2229,311 | 0,407 |
| X _{max} | 2247,776 | 0,420 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|--------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <5\%; R_m>$ | 600 mm/min | 0° |

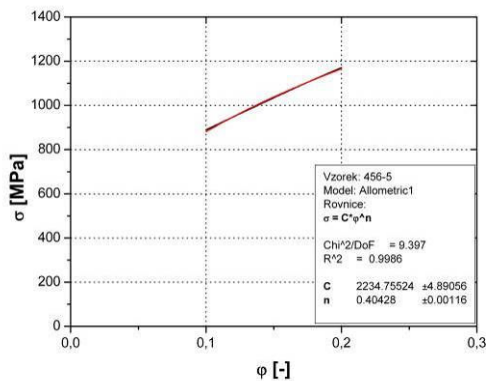
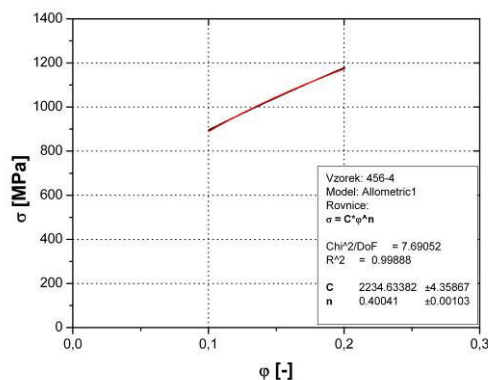
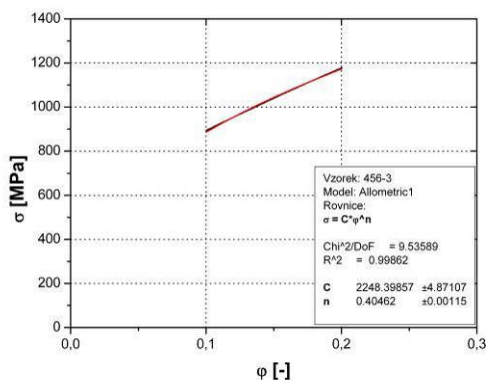
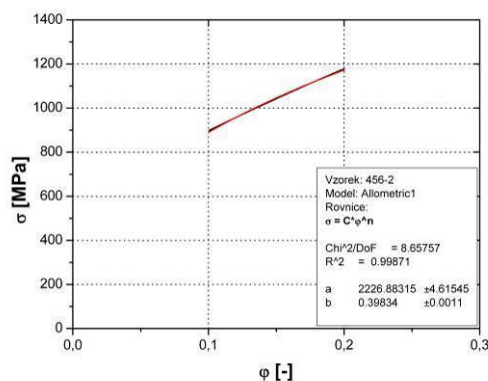
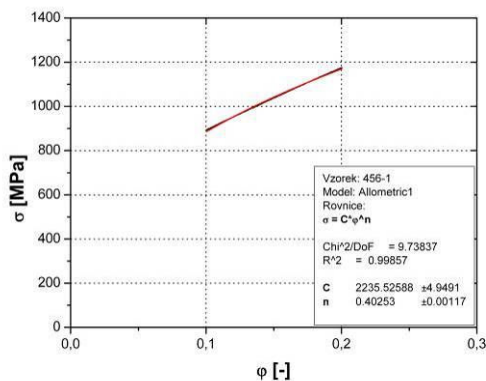


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|------------------|-----------------|--------------|
| 06-1 | 2303,212 | 0,419 |
| 06-2 | 2285,340 | 0,412 |
| 06-3 | 2289,615 | 0,415 |
| 06-4 | 2297,931 | 0,426 |
| 06-5 | 2293,495 | 0,419 |
| □ | 2293,919 | 0,418 |
| s | 6,978 | 0,005 |
| X _{min} | 2285,340 | 0,412 |
| X _{max} | 2303,212 | 0,426 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|-------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <10;20>\%$ | 600 mm/min | 45° |

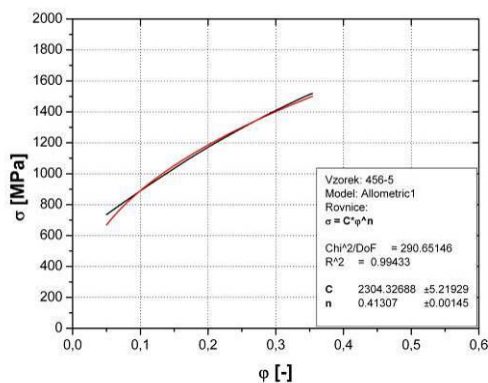
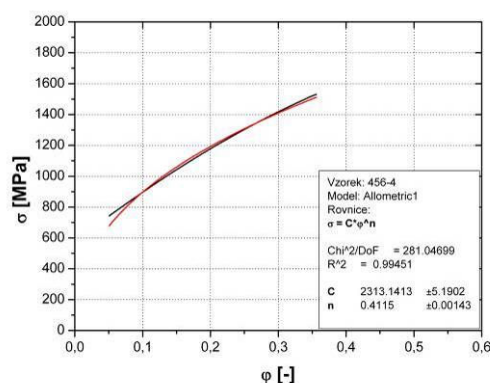
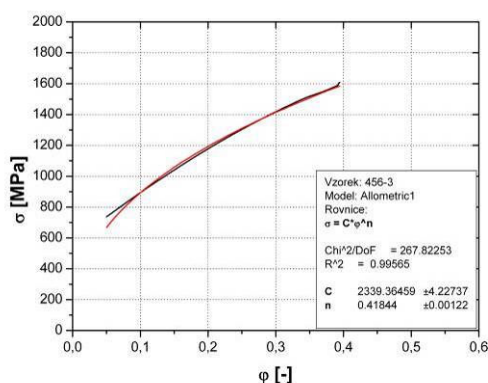
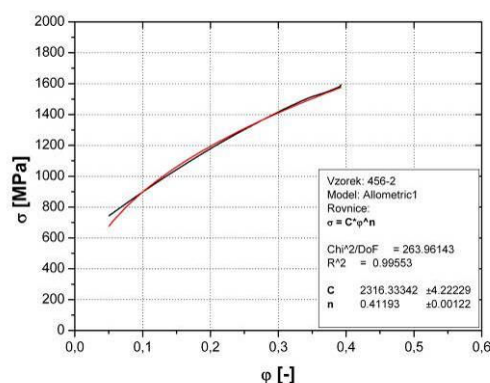
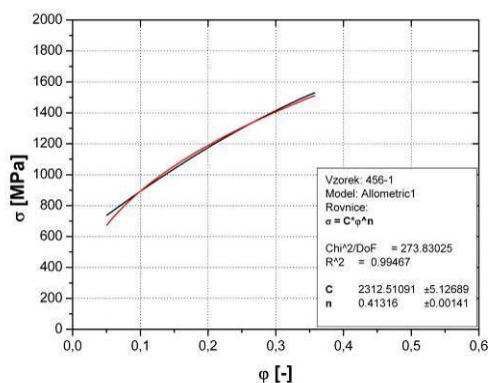


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|------------------|-----------------|--------------|
| 456-1 | 2235,526 | 0,403 |
| 456-2 | 2226,883 | 0,398 |
| 456-3 | 2248,399 | 0,404 |
| 456-4 | 2234,634 | 0,400 |
| 456-5 | 2234,755 | 0,404 |
| □ | 2236,039 | 0,401 |
| s | 7,754 | 0,002 |
| X _{min} | 2226,883 | 0,398 |
| X _{max} | 2248,399 | 0,404 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|--------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <5\%; R_m>$ | 600 mm/min | 45° |



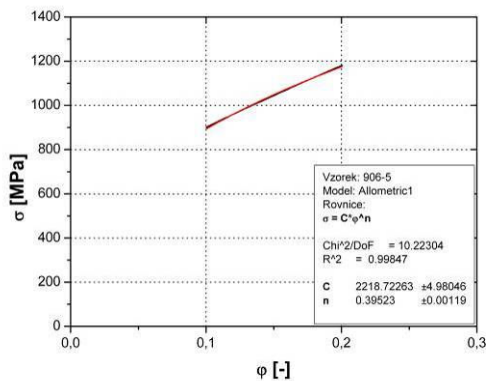
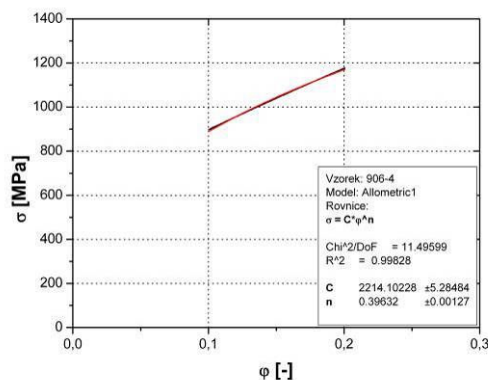
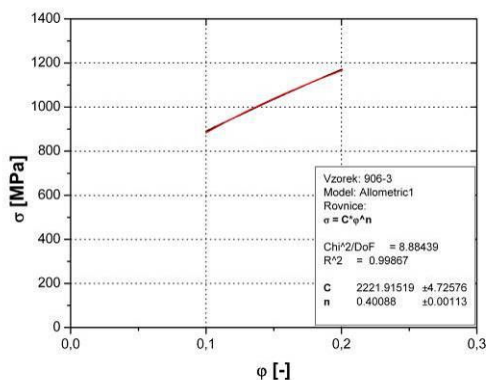
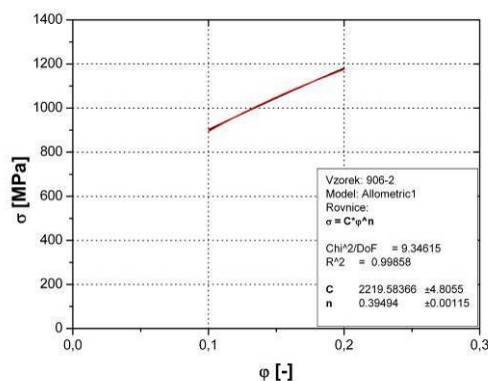
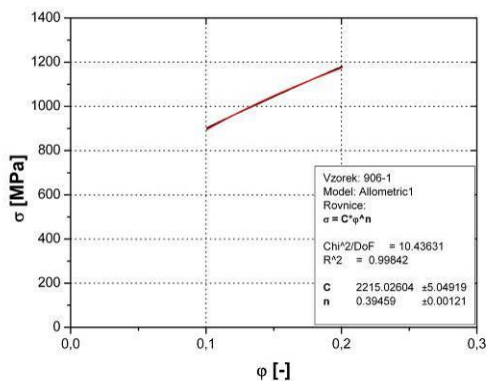
Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|--------------|-----------------|--------------|
| 456-1 | 2312,511 | 0,413 |
| 456-2 | 2316,333 | 0,412 |
| 456-3 | 2339,365 | 0,418 |
| 456-4 | 2313,142 | 0,412 |
| 456-5 | 2304,327 | 0,413 |
| □ | 2317,336 | 0,414 |
| s | 13,112 | 0,003 |
| x_{\min} | 2304,327 | 0,412 |
| x_{\max} | 2339,365 | 0,418 |



Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|-------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <10;20>\%$ | 600 mm/min | 90° |

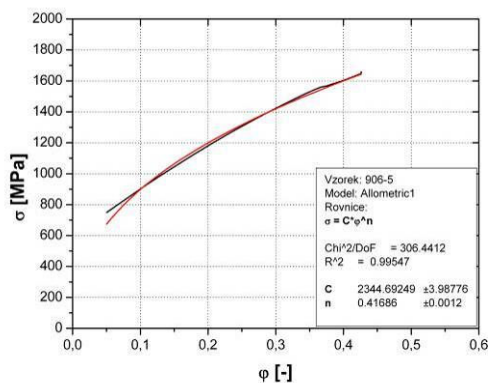
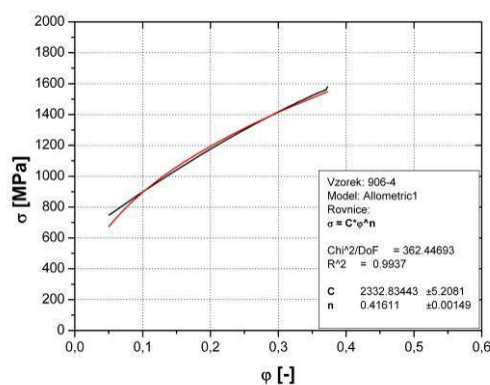
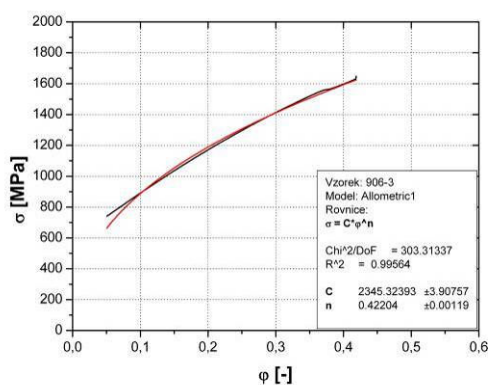
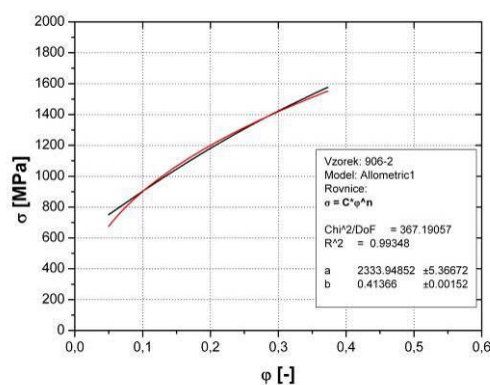
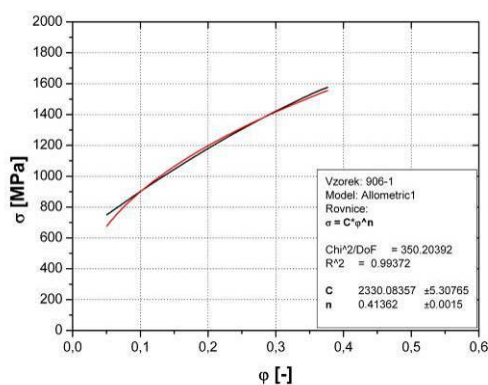


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|------------------|-----------------|--------------|
| 906-1 | 2215,026 | 0,395 |
| 906-2 | 2219,854 | 0,395 |
| 906-3 | 2221,915 | 0,401 |
| 906-4 | 2214,102 | 0,396 |
| 906-5 | 2218,723 | 0,395 |
| □ | 2217,924 | 0,396 |
| s | 2,290 | 0,003 |
| X _{min} | 2214,102 | 0,395 |
| X _{max} | 2221,915 | 0,401 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|--------------------------|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <5\%; R_m>$ | 600 mm/min | 90° |

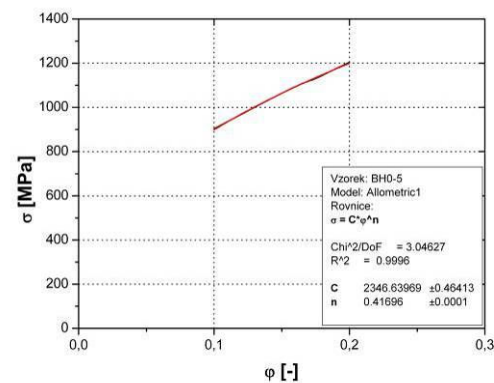
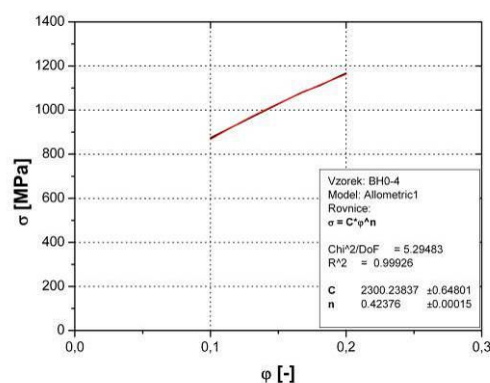
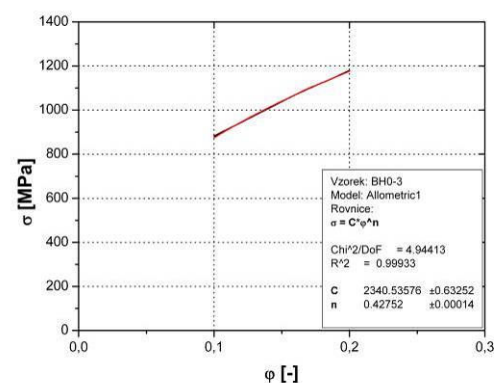
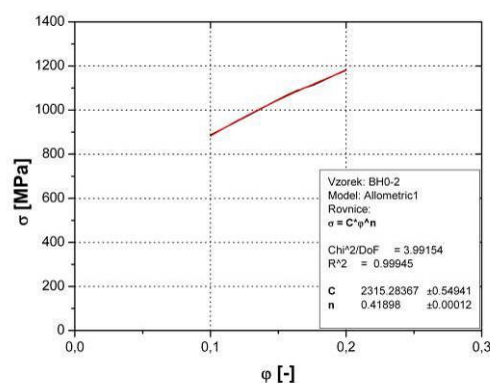
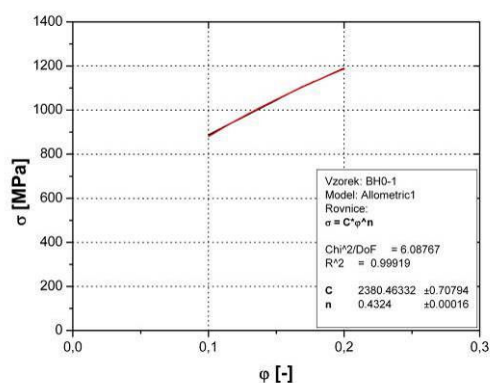


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|--------------|-----------------|--------------|
| 906-1 | 2330,084 | 0,414 |
| 906-2 | 2333,949 | 0,414 |
| 906-3 | 2345,324 | 0,422 |
| 906-4 | 2332,834 | 0,416 |
| 906-5 | 2344,692 | 0,417 |
| □ | 2337,377 | 0,417 |
| s | 7,111 | 0,003 |
| x_{min} | 2330,084 | 0,414 |
| x_{max} | 2345,324 | 0,422 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|-------------------------|-----|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <10;20>\%$ | BH0 | 10 mm/min | 0° |

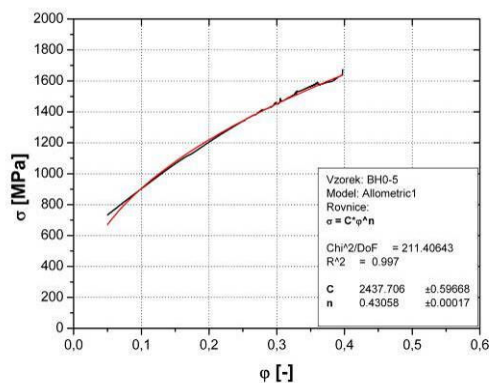
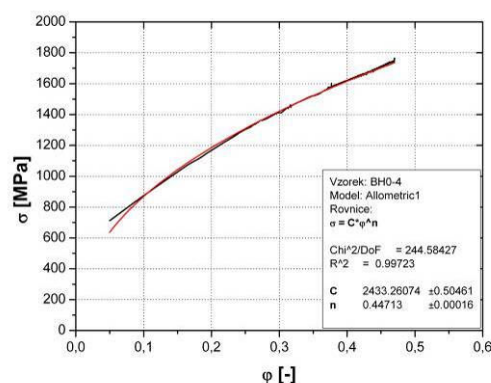
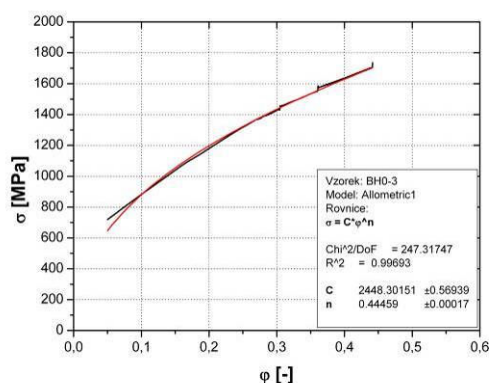
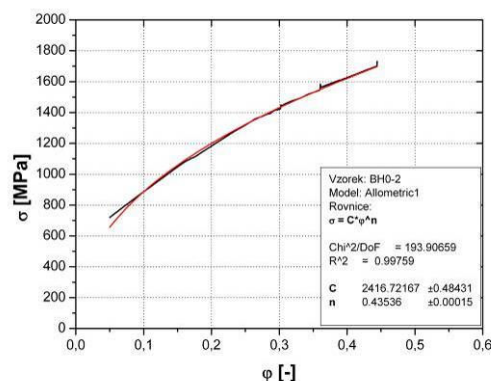
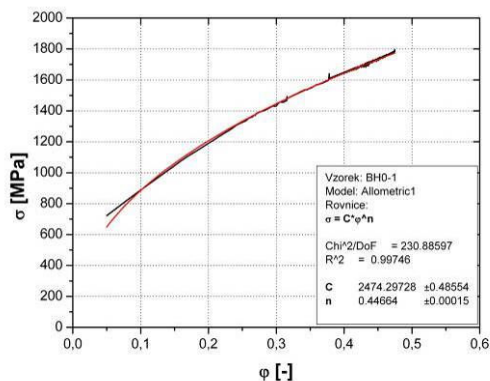


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|------------------|-----------------|--------------|
| BH0-1 | 2380,463 | 0,432 |
| BH0-2 | 2315,284 | 0,419 |
| BH0-3 | 2340,536 | 0,428 |
| BH0-4 | 2300,238 | 0,424 |
| BH0-5 | 2346,640 | 0,417 |
| □ | 2336,632 | 0,424 |
| s | 30,890 | 0,006 |
| X _{min} | 2300,238 | 0,417 |
| X _{max} | 2380,463 | 0,432 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|--------------------------|-----|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <5\%; R_m>$ | BH0 | 10 mm/min | 0° |

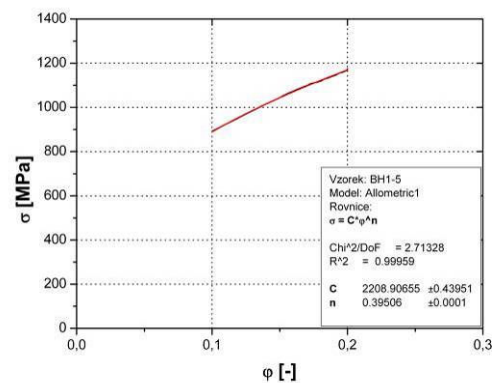
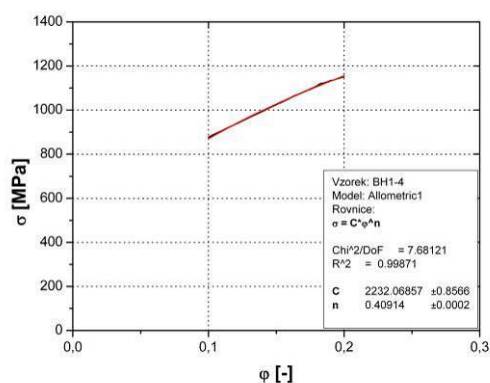
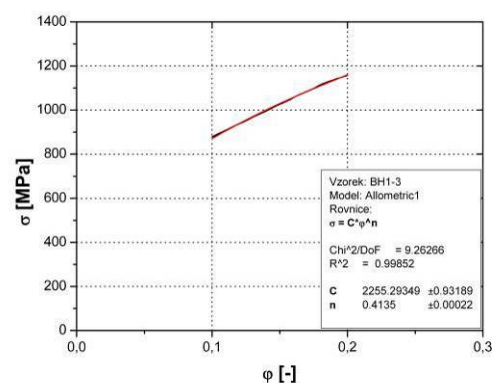
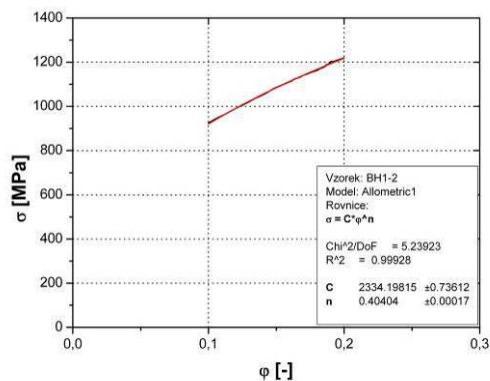
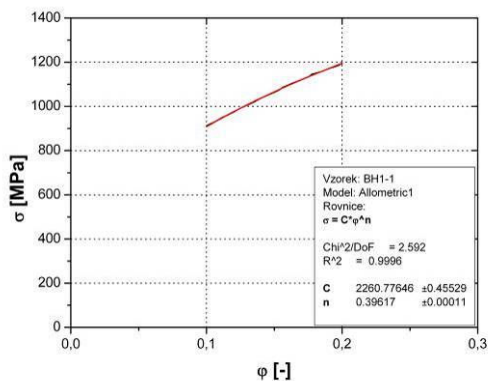


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|------------------|-----------------|--------------|
| BH0-1 | 2474,297 | 0,447 |
| BH0-2 | 2416,722 | 0,435 |
| BH0-3 | 2448,302 | 0,445 |
| BH0-4 | 2433,261 | 0,447 |
| BH0-5 | 2437,706 | 0,431 |
| □ | 2442,058 | 0,441 |
| s | 21,311 | 0,007 |
| X _{min} | 2416,722 | 0,431 |
| X _{max} | 2474,297 | 0,447 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|-------------------------|-----|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <10;20>\%$ | BH1 | 10 mm/min | 0° |

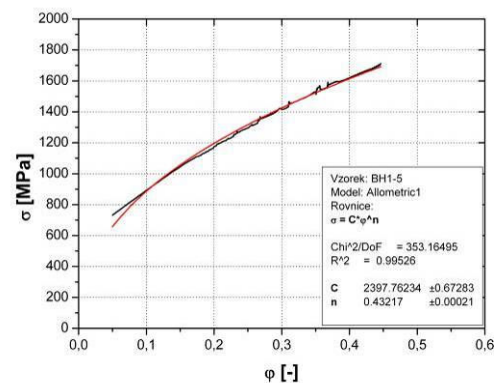
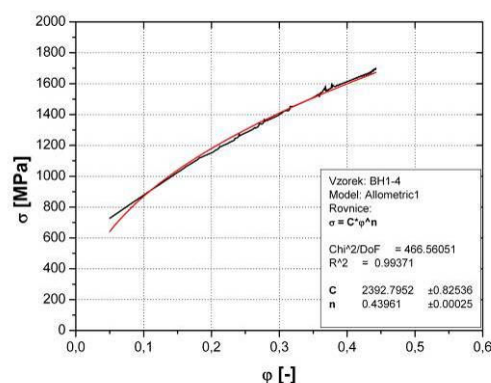
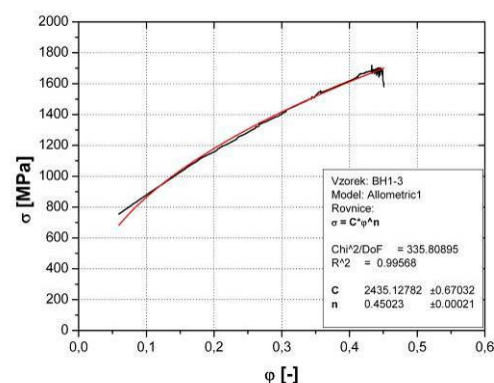
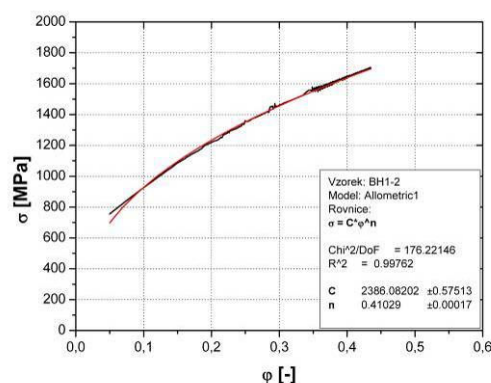
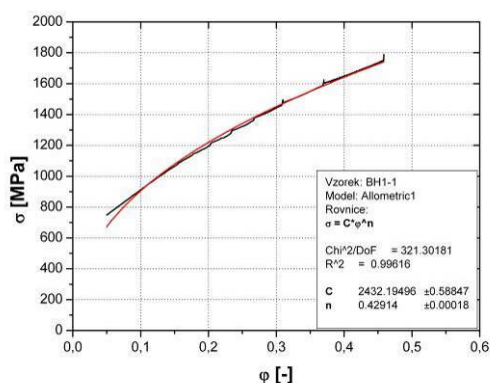


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|------------------|-----------------|--------------|
| BH1-1 | 2260,776 | 0,396 |
| BH1-2 | 2334,198 | 0,404 |
| BH1-3 | 2255,293 | 0,414 |
| BH1-4 | 2232,069 | 0,409 |
| BH1-5 | 2208,907 | 0,395 |
| □ | 2258,249 | 0,404 |
| s | 47,179 | 0,008 |
| X _{min} | 2208,907 | 0,395 |
| X _{max} | 2334,198 | 0,414 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|--------------------------|-----|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <5\%; R_m>$ | BH1 | 10 mm/min | 0° |

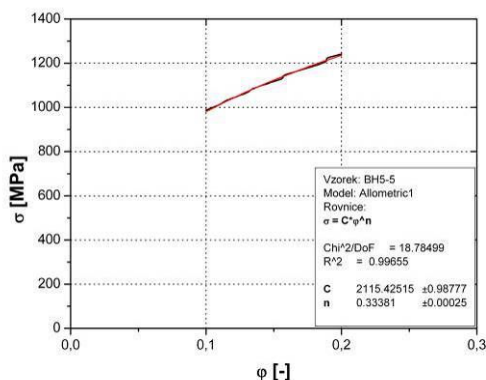
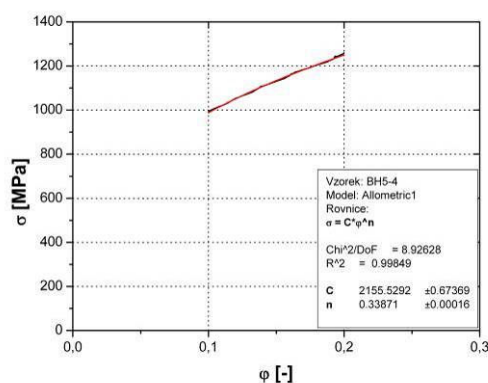
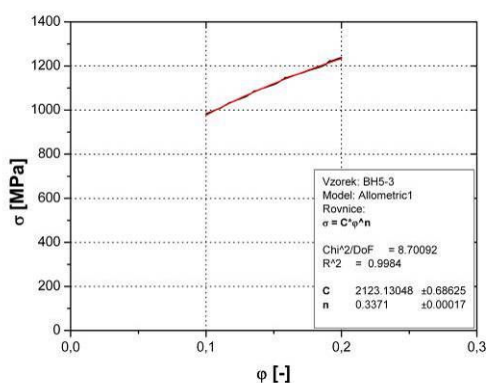
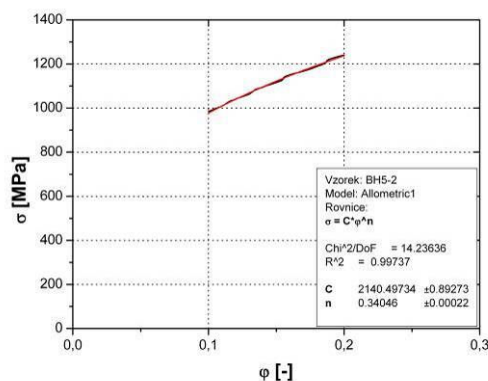
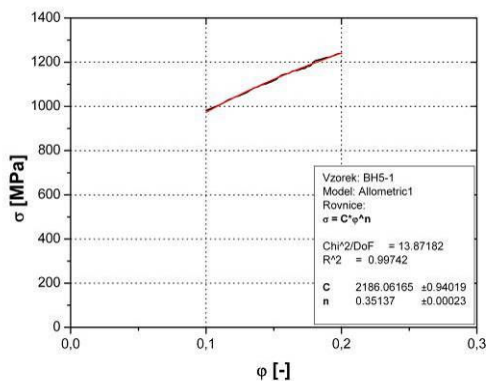


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|------------------|-----------------|--------------|
| BH1-1 | 2432,195 | 0,429 |
| BH1-2 | 2386,082 | 0,410 |
| BH1-3 | 2435,128 | 0,450 |
| BH1-4 | 2392,795 | 0,440 |
| BH1-5 | 2397,762 | 0,432 |
| □ | 2408,792 | 0,432 |
| s | 23,101 | 0,015 |
| X _{min} | 2386,082 | 0,410 |
| X _{max} | 2435,128 | 0,450 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|-------------------------|-----|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <10;20>\%$ | BH5 | 10 mm/min | 0° |

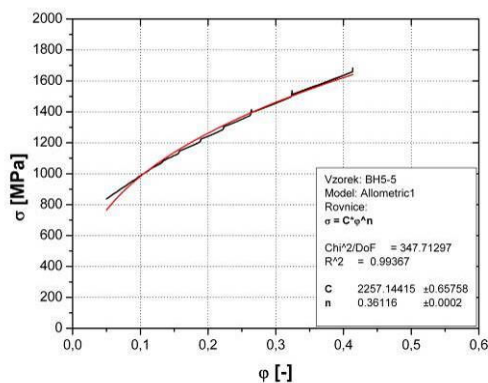
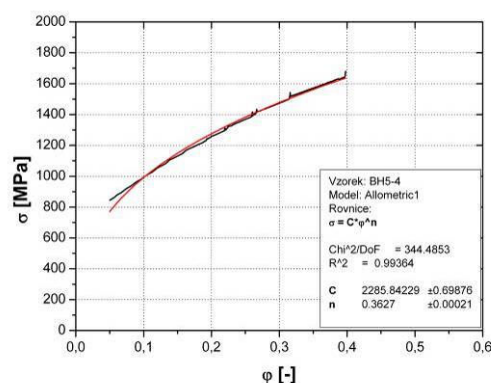
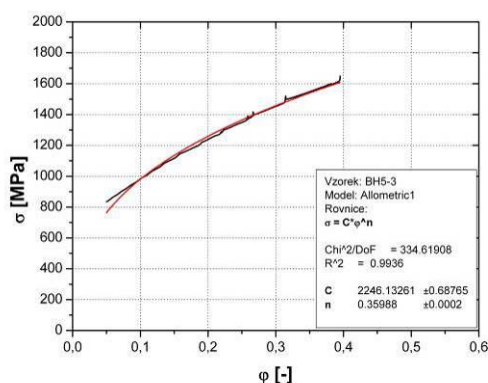
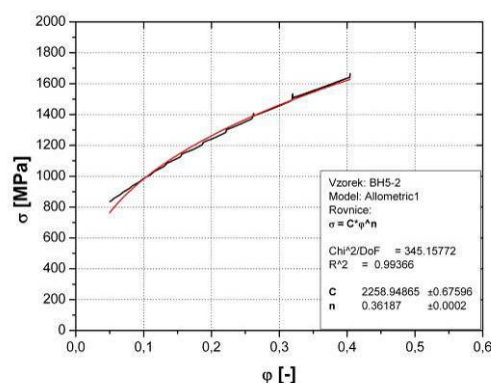
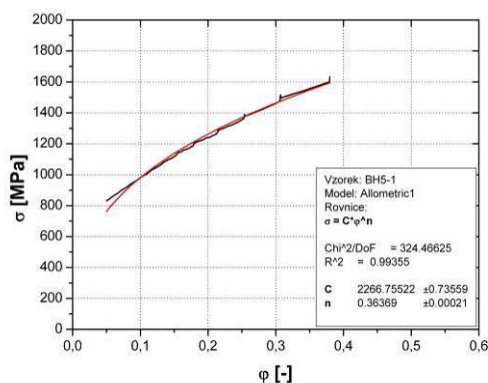


Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|------------------|-----------------|--------------|
| BH5-1 | 2186,062 | 0,351 |
| BH5-2 | 2140,497 | 0,340 |
| BH5-3 | 2123,130 | 0,337 |
| BH5-4 | 2155,529 | 0,339 |
| BH5-5 | 2115,425 | 0,334 |
| □ | 2144,129 | 0,340 |
| s | 28,135 | 0,006 |
| X _{min} | 2115,425 | 0,334 |
| X _{max} | 2186,062 | 0,351 |

Aproximace křivek zpevnění pro následující podmínky měření:

| Interval aproximace | | Rychlost deformace | Směr odebrání vzorků |
|--------------------------|-----|--------------------|----------------------|
| $\varphi \in <5\%; R_m>$ | BH5 | 10 mm/min | 0° |



Výstupní hodnoty

| Číslo vzorku | C [MPa] | n [-] |
|------------------|-----------------|--------------|
| BH5-1 | 2266,755 | 0,364 |
| BH5-2 | 2258,949 | 0,362 |
| BH5-3 | 2246,133 | 0,360 |
| BH5-4 | 2285,842 | 0,363 |
| BH5-5 | 2257,144 | 0,361 |
| □ | 2262,965 | 0,362 |
| s | 14,758 | 0,002 |
| X _{min} | 2246,133 | 0,360 |
| X _{max} | 2285,842 | 0,364 |



Data z naměřených DMP pro materiál TWIP 1200

(Příloha č. 3)



| DMP - FP | | | | |
|----------|-----------------------------|-------------------------------|--|--|
| Stopa | Hlavní osa [mm] L_1 | Vedlejší osa [mm] L_2 | Hlavní deformace [-] φ_1 | Vedlejší deformace [-] φ_2 |
| 1 | 1,849 | 3,601 | -0,15401 | 0,512559 |
| | 1,820 | 3,634 | -0,16967 | 0,521812 |
| | 1,766 | 3,761 | -0,19994 | 0,556069 |
| | 1,803 | 3,694 | -0,1792 | 0,537927 |
| | 1,590 | 3,376 | -0,21935 | 0,533818 |
| | 1,596 | 3,465 | -0,21563 | 0,5599 |
| | 1,703 | 3,344 | -0,15055 | 0,524272 |
| | 1,553 | 3,439 | -0,24308 | 0,552159 |
| | 1,669 | 3,369 | -0,17072 | 0,531645 |
| | 1,564 | 3,465 | -0,23545 | 0,559817 |
| | 1,581 | 3,455 | -0,22504 | 0,556814 |
| | | | | |
| 2 | 1,898 | 2,869 | -0,00951 | 0,403575 |
| | 1,890 | 2,880 | -0,01374 | 0,4074 |
| | 1,972 | 2,810 | 0,02891 | 0,382813 |
| | 1,964 | 2,839 | 0,024669 | 0,393157 |
| | 1,937 | 2,847 | 0,010826 | 0,395931 |
| | 1,896 | 2,910 | -0,01057 | 0,41782 |
| | 1,958 | 2,851 | 0,021609 | 0,397208 |
| | 1,873 | 3,043 | -0,05541 | 0,429963 |
| | 1,881 | 3,059 | -0,05114 | 0,435081 |
| | 1,912 | 3,093 | -0,0348 | 0,446088 |
| | 1,905 | 2,991 | -0,03846 | 0,412753 |
| | 1,991 | 2,948 | 0,005692 | 0,398102 |
| | 1,920 | 3,011 | -0,03062 | 0,419327 |
| | 1,937 | 3,019 | -0,0218 | 0,421909 |
| | 1,928 | 3,055 | -0,02621 | 0,433964 |
| | | | | |
| 3 | 2,001 | 2,827 | 0,043228 | 0,388758 |
| | 2,072 | 2,806 | 0,0782 | 0,381272 |
| | 2,120 | 2,774 | 0,101102 | 0,370027 |
| | 2,148 | 2,772 | 0,114223 | 0,369093 |
| | 2,132 | 2,799 | 0,106746 | 0,378984 |
| | 2,105 | 2,766 | 0,093934 | 0,36712 |
| | 2,044 | 2,800 | 0,064594 | 0,379186 |
| | 2,148 | 2,889 | 0,081567 | 0,37798 |
| | 2,094 | 2,884 | 0,056131 | 0,37623 |
| | 2,054 | 2,892 | 0,036779 | 0,37907 |
| | 2,104 | 2,881 | 0,060895 | 0,375167 |
| | 2,121 | 2,883 | 0,068942 | 0,375855 |
| | 2,103 | 2,893 | 0,06042 | 0,379318 |
| | | | | |



| DMP - FP | | | | |
|----------|-----------------------------|-------------------------------|--|--|
| Stopa | Hlavní osa [mm] L_1 | Vedlejší osa [mm] L_2 | Hlavní deformace [-] φ_1 | Vedlejší deformace [-] φ_2 |
| 4 | 2,306 | 2,776 | 0,185074 | 0,370836 |
| | 2,296 | 2,758 | 0,180712 | 0,364358 |
| | 2,340 | 2,744 | 0,199958 | 0,358994 |
| | 2,267 | 2,749 | 0,168143 | 0,360835 |
| | 2,341 | 2,879 | 0,167528 | 0,374563 |
| | 2,395 | 2,837 | 0,190395 | 0,359698 |
| | 2,296 | 2,844 | 0,148225 | 0,36234 |
| | 2,329 | 2,857 | 0,162317 | 0,36689 |
| | 2,448 | 2,797 | 0,2125 | 0,345602 |
| | 2,312 | 2,839 | 0,155315 | 0,360545 |
| | 2,623 | 2,686 | 0,313896 | 0,337853 |
| | 2,467 | 2,677 | 0,252689 | 0,334526 |
| 5 | 2,567 | 2,660 | 0,292424 | 0,327961 |
| | 2,532 | 2,634 | 0,278695 | 0,318189 |
| | 2,599 | 2,699 | 0,304813 | 0,342471 |
| | 2,580 | 2,686 | 0,297475 | 0,337739 |
| | 2,581 | 2,663 | 0,297863 | 0,328987 |
| | 2,544 | 2,763 | 0,250852 | 0,333316 |
| | 2,585 | 2,747 | 0,266622 | 0,327482 |
| | 2,654 | 2,751 | 0,292957 | 0,328938 |
| | 2,614 | 2,765 | 0,278076 | 0,333974 |
| | 2,596 | 2,766 | 0,270953 | 0,334455 |
| | 2,684 | 2,748 | 0,304289 | 0,327907 |
| | 2,306 | 2,776 | 0,185074 | 0,370836 |



| DMP - FR | | | | |
|----------|-----------------------------|-------------------------------|--|--|
| Stopa | Hlavní osa [mm] L_1 | Vedlejší osa [mm] L_2 | Hlavní deformace [-] φ_1 | Vedlejší deformace [-] φ_2 |
| 1 | 1,679 | 3,209 | -0,17534 | 0,475914 |
| | 1,638 | 3,224 | -0,19984 | 0,480597 |
| | 1,672 | 3,241 | -0,17929 | 0,486009 |
| | 1,665 | 3,195 | -0,18349 | 0,471635 |
| | 1,723 | 3,248 | -0,14925 | 0,488137 |
| | 1,678 | 3,187 | -0,17571 | 0,469128 |
| | 1,694 | 3,232 | -0,16622 | 0,48315 |
| | 1,731 | 3,198 | -0,14461 | 0,472449 |
| | 1,699 | 3,196 | -0,16317 | 0,471988 |
| | 1,732 | 3,172 | -0,14404 | 0,464254 |
| | 1,714 | 3,226 | -0,15442 | 0,481291 |
| | 1,686 | 3,241 | -0,17095 | 0,48595 |
| | 1,985 | 3,044 | -0,00765 | 0,423221 |
| 2 | 1,955 | 3,068 | -0,02292 | 0,430926 |
| | 1,959 | 3,016 | -0,02088 | 0,413904 |
| | 1,911 | 3,076 | -0,04569 | 0,433678 |
| | 2,009 | 2,915 | 0,004379 | 0,380012 |
| | 1,965 | 3,055 | -0,01783 | 0,426828 |
| | 1,988 | 3,001 | -0,00617 | 0,408854 |
| | 1,898 | 3,116 | -0,05262 | 0,446595 |
| | 2,014 | 2,987 | 0,006867 | 0,404452 |
| | 2,020 | 2,933 | 0,00961 | 0,386012 |
| | 1,923 | 3,086 | -0,03943 | 0,436987 |
| | 1,897 | 3,049 | -0,05304 | 0,424862 |
| | 2,061 | 2,904 | 0,029877 | 0,376137 |
| 3 | 2,058 | 2,874 | 0,028421 | 0,365765 |
| | 2,129 | 2,874 | 0,062339 | 0,365633 |
| | 2,090 | 2,871 | 0,043911 | 0,364879 |
| | 2,051 | 2,909 | 0,025014 | 0,377858 |
| | 2,103 | 2,952 | 0,050051 | 0,392531 |
| | 2,074 | 2,906 | 0,036165 | 0,376982 |
| | 2,107 | 2,861 | 0,051773 | 0,361065 |
| | 2,048 | 2,940 | 0,02355 | 0,388458 |
| | 2,046 | 2,922 | 0,022573 | 0,382317 |
| | 2,106 | 2,930 | 0,051477 | 0,385051 |
| | 2,117 | 2,915 | 0,056686 | 0,379918 |
| | 2,034 | 2,911 | 0,016912 | 0,378545 |



| DMP - FR | | | | |
|----------|-----------------------------|-------------------------------|--|--|
| Stopa | Hlavní osa [mm] L_1 | Vedlejší osa [mm] L_2 | Hlavní deformace [-] φ_1 | Vedlejší deformace [-] φ_2 |
| 4 | 2,290 | 2,789 | 0,135066 | 0,335732 |
| | 2,324 | 2,839 | 0,149976 | 0,353565 |
| | 2,288 | 2,840 | 0,134305 | 0,35392 |
| | 2,314 | 2,815 | 0,145863 | 0,345011 |
| | 2,374 | 2,828 | 0,171271 | 0,349777 |
| | 2,356 | 2,833 | 0,163651 | 0,351445 |
| | 2,387 | 2,756 | 0,176724 | 0,323829 |
| | 2,365 | 2,823 | 0,167464 | 0,347849 |
| | 2,417 | 2,745 | 0,189213 | 0,319829 |
| | 2,398 | 2,800 | 0,181321 | 0,33965 |
| | 2,345 | 2,809 | 0,158972 | 0,342755 |
| | | | | |
| 5 | 2,575 | 2,677 | 0,25241 | 0,294778 |
| | 2,617 | 2,655 | 0,268715 | 0,286493 |
| | 2,543 | 2,706 | 0,240031 | 0,305442 |
| | 2,651 | 2,668 | 0,281623 | 0,291378 |
| | 2,578 | 2,723 | 0,2537 | 0,311783 |
| | 2,613 | 2,718 | 0,267185 | 0,310012 |
| | 2,629 | 2,713 | 0,27329 | 0,308011 |
| | 2,576 | 2,678 | 0,252924 | 0,295119 |
| | 2,495 | 2,698 | 0,221096 | 0,302559 |
| | 2,598 | 2,710 | 0,261428 | 0,307011 |
| | 2,523 | 2,687 | 0,23194 | 0,298474 |
| | 2,543 | 2,741 | 0,240031 | 0,318371 |
| | 2,627 | 2,677 | 0,272529 | 0,294844 |
| | 2,653 | 2,713 | 0,282377 | 0,308103 |
| | | | | |



| DMP – FR 13 | | | | |
|-------------|-----------------------------|-------------------------------|--|--|
| Stopa | Hlavní osa [mm] L_1 | Vedlejší osa [mm] L_2 | Hlavní deformace [-] φ_1 | Vedlejší deformace [-] φ_2 |
| 1 | 1,704 | 3,163 | -0,16043 | 0,461569 |
| | 1,736 | 3,164 | -0,14173 | 0,461968 |
| | 1,697 | 3,197 | -0,16445 | 0,472234 |
| | 1,687 | 3,213 | -0,17036 | 0,477253 |
| | 1,712 | 3,178 | -0,15565 | 0,4663 |
| | 1,684 | 3,156 | -0,17214 | 0,459354 |
| | 1,641 | 3,168 | -0,19829 | 0,463149 |
| | 1,658 | 3,197 | -0,18798 | 0,472261 |
| | 1,734 | 3,218 | -0,14306 | 0,478808 |
| | 1,677 | 3,145 | -0,17621 | 0,455982 |
| | 1,647 | 3,212 | -0,19432 | 0,476954 |
| | 1,629 | 3,209 | -0,20531 | 0,475874 |
| 2 | 1,941 | 3,050 | -0,03011 | 0,42519 |
| | 1,991 | 2,960 | -0,00451 | 0,395075 |
| | 1,997 | 3,000 | -0,00179 | 0,408691 |
| | 1,955 | 3,026 | -0,02302 | 0,41729 |
| | 1,933 | 3,046 | -0,03424 | 0,423878 |
| | 1,980 | 3,007 | -0,01022 | 0,410987 |
| | 1,965 | 2,985 | -0,01774 | 0,403712 |
| | 1,971 | 3,055 | -0,01499 | 0,426975 |
| | 1,983 | 2,944 | -0,00891 | 0,389986 |
| | 2,005 | 2,980 | 0,002542 | 0,401987 |
| 3 | 2,108 | 2,906 | 0,052563 | 0,376687 |
| | 2,026 | 2,915 | 0,01275 | 0,380089 |
| | 2,017 | 2,947 | 0,008297 | 0,390944 |
| | 2,048 | 2,953 | 0,02355 | 0,39287 |
| | 2,047 | 2,940 | 0,023061 | 0,388458 |
| | 2,051 | 2,895 | 0,025051 | 0,373034 |
| | 2,094 | 2,876 | 0,045889 | 0,366363 |
| | 2,016 | 2,915 | 0,007827 | 0,379918 |
| | 2,089 | 2,923 | 0,043372 | 0,382616 |
| | 2,029 | 2,874 | 0,014229 | 0,365753 |
| | 2,068 | 2,918 | 0,033164 | 0,380967 |
| | 2,076 | 2,945 | 0,037129 | 0,390157 |
| | 2,054 | 2,929 | 0,026475 | 0,384709 |
| | 2,076 | 2,870 | 0,037259 | 0,364225 |



| DMP – FR 13 | | | | |
|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|--|--|
| Stopa | Hlavní osa [mm] L_1 | Vedlejší osa [mm] L_2 | Hlavní deformace [-] φ_1 | Vedlejší deformace [-] φ_2 |
| 4 | 2,237 | 2,856 | 0,111822 | 0,359407 |
| | 2,345 | 2,769 | 0,158972 | 0,328684 |
| | 2,268 | 2,827 | 0,125585 | 0,349347 |
| | 2,287 | 2,797 | 0,133927 | 0,338527 |
| | 2,267 | 2,865 | 0,125046 | 0,362669 |
| | 2,298 | 2,789 | 0,138725 | 0,335829 |
| | 2,317 | 2,814 | 0,147173 | 0,344741 |
| | 2,318 | 2,846 | 0,14753 | 0,355874 |
| | 2,327 | 2,811 | 0,151266 | 0,343667 |
| | 2,308 | 2,777 | 0,143068 | 0,33157 |
| | 2,248 | 2,826 | 0,116581 | 0,348966 |
| | 2,288 | 2,836 | 0,134364 | 0,352412 |
| 5 | 2,477 | 2,740 | 0,213734 | 0,318006 |
| | 2,598 | 2,672 | 0,261338 | 0,292876 |
| | 2,463 | 2,696 | 0,208066 | 0,301818 |
| | 2,439 | 2,710 | 0,198274 | 0,306997 |
| | 2,528 | 2,702 | 0,234001 | 0,303948 |
| | 2,550 | 2,695 | 0,242944 | 0,301447 |
| | 2,543 | 2,702 | 0,239913 | 0,303861 |
| | 2,584 | 2,715 | 0,255972 | 0,308764 |
| | 2,527 | 2,720 | 0,233583 | 0,310862 |
| | 2,537 | 2,662 | 0,237654 | 0,289169 |
| | 2,493 | 2,694 | 0,22034 | 0,300962 |
| Předdeformace 1 | 1,936 | 2,228 | -0,03249 | 0,110952 |
| | 1,934 | 2,228 | -0,03372 | 0,110949 |
| | 1,943 | 2,228 | -0,02889 | 0,110952 |
| Předdeformace 2 | 1,986 | 2,220 | -0,00699 | 0,107479 |
| | 1,977 | 2,220 | -0,01154 | 0,107614 |
| | 1,984 | 2,215 | -0,00798 | 0,105525 |
| Předdeformace 3 | 2,015 | 2,208 | 0,007335 | 0,10191 |
| | 2,011 | 2,214 | 0,005313 | 0,10471 |
| | 2,018 | 2,215 | 0,008739 | 0,105434 |
| Předdeformace 4 | 2,079 | 2,209 | 0,038585 | 0,102755 |
| | 2,072 | 2,209 | 0,03511 | 0,102747 |
| | 2,063 | 2,202 | 0,030712 | 0,099211 |
| Předdeformace 5 | 2,142 | 2,199 | 0,06841 | 0,098112 |
| | 2,130 | 2,195 | 0,062949 | 0,09631 |
| | 2,134 | 2,205 | 0,064593 | 0,100912 |



| DMP – FR 23 | | | | |
|-------------|-----------------------------|-------------------------------|--|--|
| Stopa | Hlavní osa [mm] L_1 | Vedlejší osa [mm] L_2 | Hlavní deformace [-] φ_1 | Vedlejší deformace [-] φ_2 |
| 1 | 1,690 | 3,239 | -0,16859 | 0,485224 |
| | 1,698 | 3,183 | -0,16386 | 0,467974 |
| | 1,661 | 3,241 | -0,18607 | 0,485932 |
| | 1,700 | 3,222 | -0,16269 | 0,479987 |
| | 1,748 | 3,227 | -0,13512 | 0,481665 |
| | 1,716 | 3,257 | -0,15341 | 0,490916 |
| | 1,672 | 3,277 | -0,17929 | 0,497044 |
| | 1,677 | 3,238 | -0,17631 | 0,484941 |
| | 1,735 | 3,175 | -0,14231 | 0,465394 |
| | 1,631 | 3,269 | -0,20411 | 0,494382 |
| | 1,660 | 3,242 | -0,18675 | 0,486262 |
| | | | | |
| 2 | 2,000 | 2,926 | -0,00041 | 0,383685 |
| | 2,010 | 2,895 | 0,004958 | 0,372873 |
| | 1,978 | 2,946 | -0,01139 | 0,390637 |
| | 1,986 | 2,923 | -0,00729 | 0,382659 |
| | 1,944 | 3,034 | -0,02857 | 0,41993 |
| | 1,983 | 2,937 | -0,0087 | 0,387548 |
| | 1,960 | 2,992 | -0,02037 | 0,405957 |
| | 1,991 | 2,872 | -0,00443 | 0,365031 |
| | 1,969 | 2,962 | -0,01579 | 0,396054 |
| | 1,989 | 2,930 | -0,00547 | 0,384936 |
| | 2,004 | 2,886 | 0,001611 | 0,37005 |
| | 1,931 | 2,972 | -0,03515 | 0,399284 |
| | 1,924 | 3,036 | -0,03915 | 0,420589 |
| | | | | |
| 3 | 2,023 | 2,865 | 0,011411 | 0,362566 |
| | 2,042 | 2,884 | 0,020616 | 0,369066 |
| | 2,073 | 2,864 | 0,035747 | 0,362277 |
| | 2,049 | 2,872 | 0,024115 | 0,365135 |
| | 2,083 | 2,891 | 0,040495 | 0,371788 |
| | 2,108 | 2,843 | 0,052426 | 0,354946 |
| | 2,043 | 2,858 | 0,021105 | 0,360108 |
| | 2,065 | 2,851 | 0,031816 | 0,357684 |
| | 2,064 | 2,894 | 0,031205 | 0,372623 |
| | 2,105 | 2,899 | 0,051002 | 0,374459 |
| | 2,101 | 2,858 | 0,0491 | 0,360279 |
| | 2,140 | 2,851 | 0,067492 | 0,357878 |
| | 2,110 | 2,841 | 0,053335 | 0,354122 |

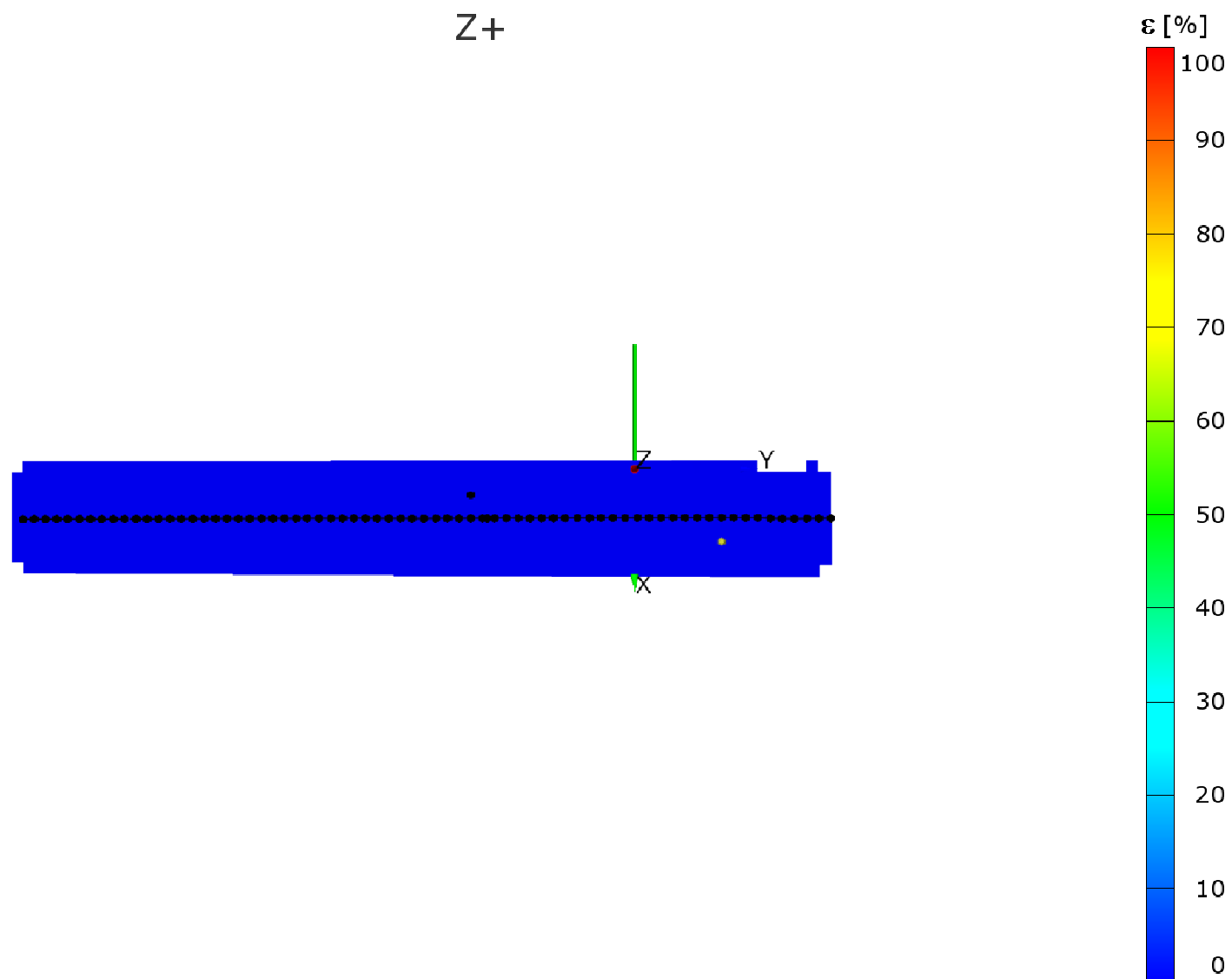


| DMP – FR 23 | | | | |
|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|--|--|
| Stopa | Hlavní osa [mm] L_1 | Vedlejší osa [mm] L_2 | Hlavní deformace [-] φ_1 | Vedlejší deformace [-] φ_2 |
| 4 | 2,278 | 2,835 | 0,129984 | 0,352166 |
| | 2,365 | 2,796 | 0,167464 | 0,338222 |
| | 2,314 | 2,798 | 0,145664 | 0,339122 |
| | 2,295 | 2,787 | 0,137419 | 0,334969 |
| | 2,329 | 2,765 | 0,15233 | 0,32725 |
| | 2,345 | 2,801 | 0,158972 | 0,339914 |
| | 2,312 | 2,784 | 0,144799 | 0,333937 |
| | 2,291 | 2,799 | 0,135675 | 0,339196 |
| | 2,266 | 2,812 | 0,124582 | 0,343785 |
| | 2,345 | 2,762 | 0,158972 | 0,325861 |
| | 2,364 | 2,760 | 0,167041 | 0,325186 |
| | 2,278 | 2,799 | 0,129984 | 0,339157 |
| | 2,618 | 2,704 | 0,269097 | 0,304684 |
| 5 | 2,537 | 2,724 | 0,237668 | 0,312105 |
| | 2,499 | 2,678 | 0,222577 | 0,295233 |
| | 2,548 | 2,704 | 0,241995 | 0,304713 |
| | 2,613 | 2,682 | 0,267185 | 0,296611 |
| | 2,589 | 2,719 | 0,257958 | 0,310305 |
| | 2,583 | 2,695 | 0,255638 | 0,301447 |
| | 2,577 | 2,681 | 0,253312 | 0,296292 |
| | 2,634 | 2,694 | 0,275264 | 0,300927 |
| | 2,568 | 2,680 | 0,249866 | 0,295958 |
| | 1,857 | 2,542 | -0,07459 | 0,24311 |
| Předdeformace 1 | 1,849 | 2,537 | -0,07891 | 0,241209 |
| | 1,862 | 2,520 | -0,0719 | 0,234405 |
| | 1,964 | 2,484 | -0,01842 | 0,220013 |
| Předdeformace 2 | 1,982 | 2,461 | -0,00898 | 0,210795 |
| | 1,976 | 2,476 | -0,01229 | 0,21669 |
| | 2,037 | 2,442 | 0,018394 | 0,202973 |
| Předdeformace 3 | 2,021 | 2,447 | 0,010512 | 0,204709 |
| | 2,038 | 2,462 | 0,01869 | 0,211209 |
| | 2,180 | 2,447 | 0,085953 | 0,20481 |
| Předdeformace 4 | 2,169 | 2,440 | 0,080773 | 0,201908 |
| | 2,186 | 2,441 | 0,088542 | 0,202294 |
| | 2,336 | 2,415 | 0,155108 | 0,191611 |
| Předdeformace 5 | 2,336 | 2,430 | 0,155312 | 0,198113 |
| | 2,355 | 2,425 | 0,163096 | 0,195912 |

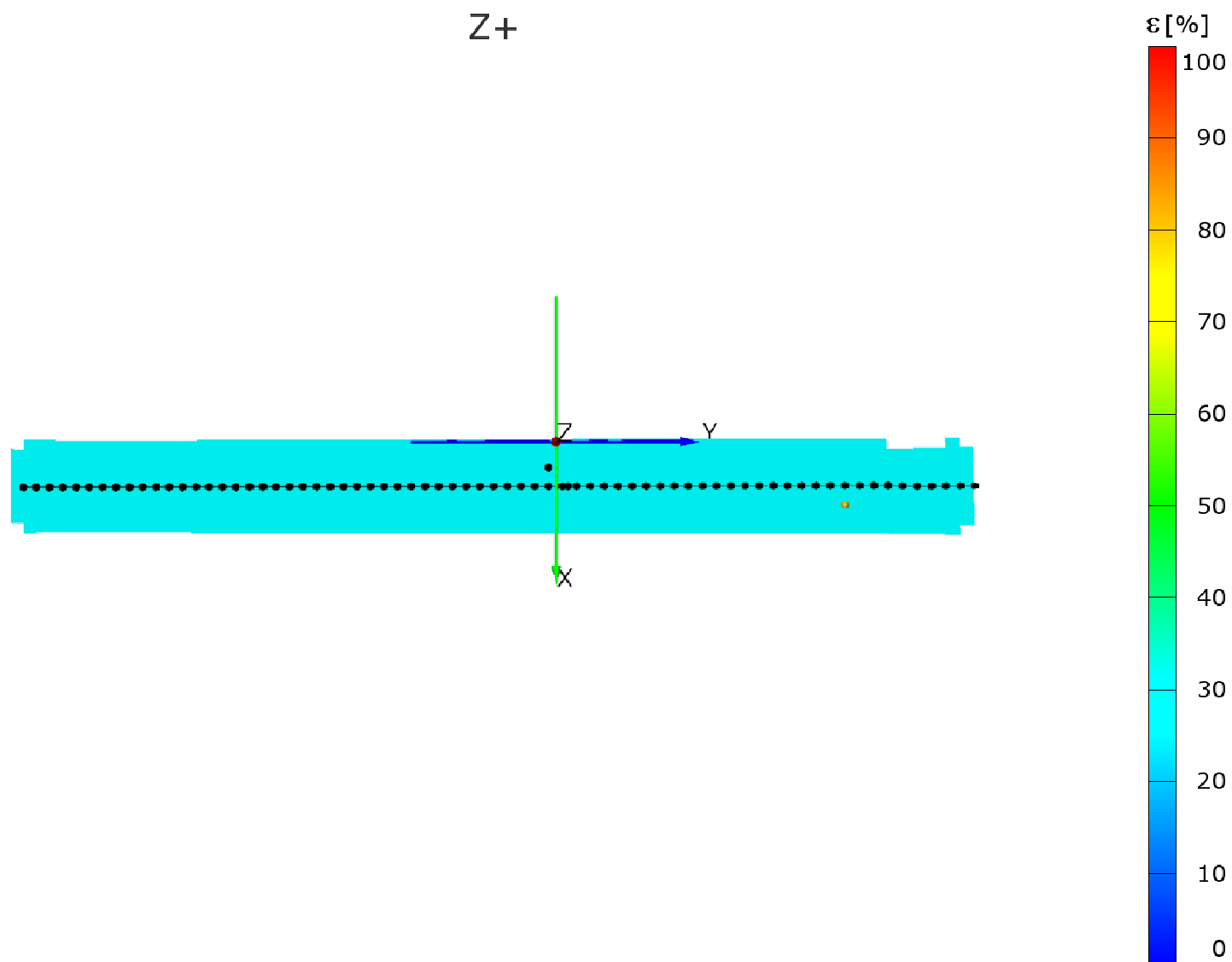


Snímky základních stavů rozložení deformace pomocí optického měření deformace (**ARAMIS**)

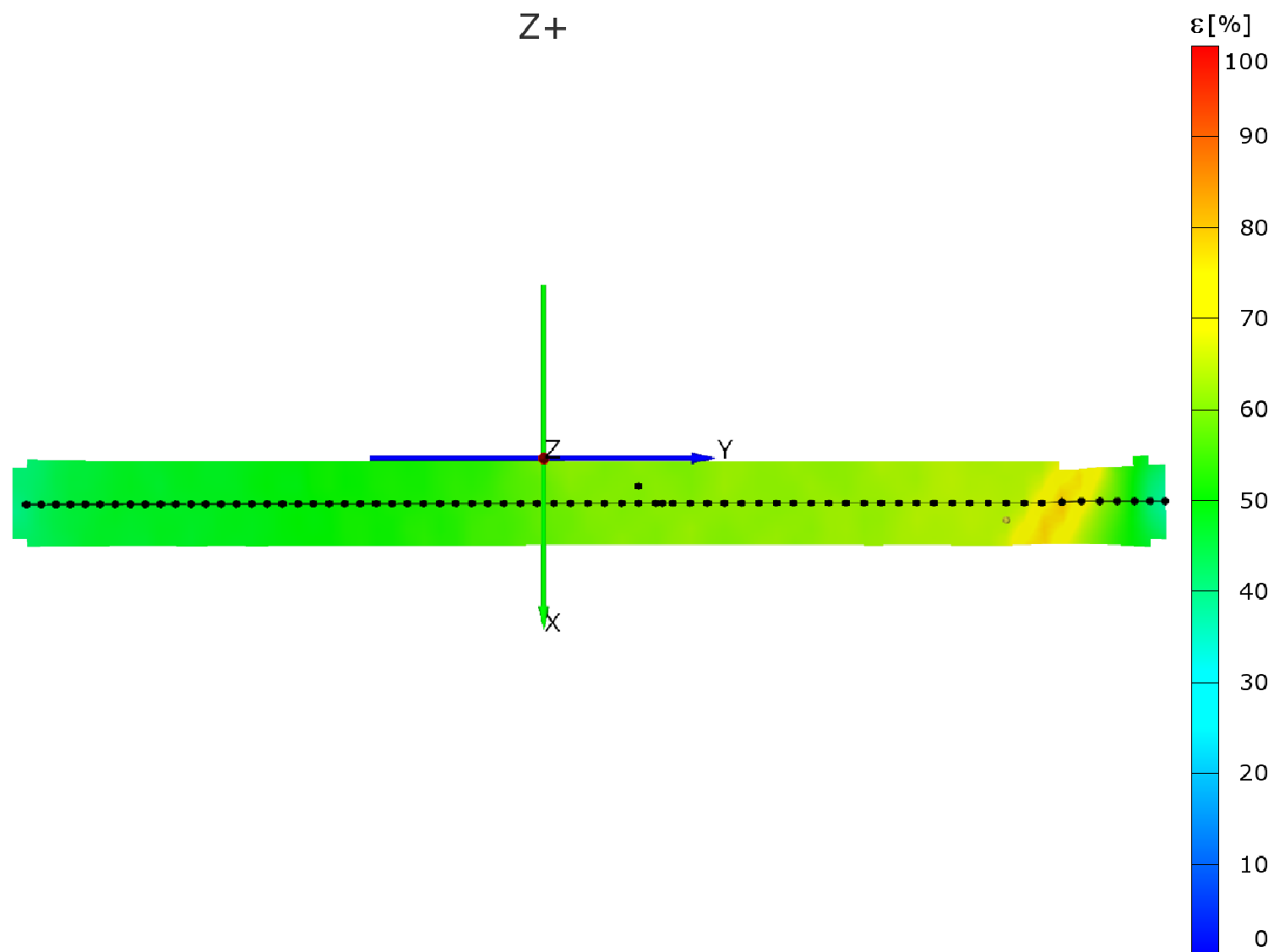
(Příloha č. 4)



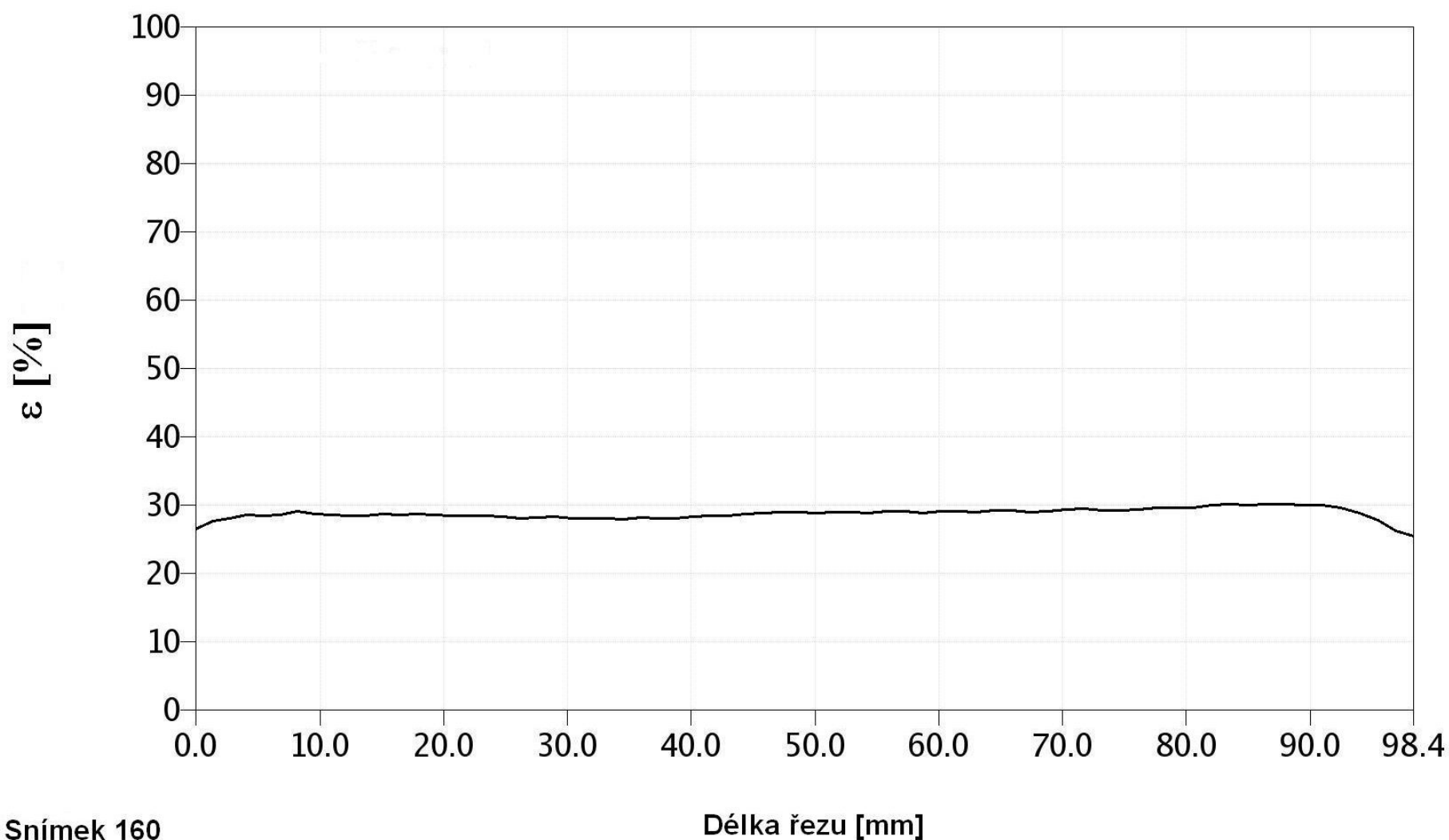
Obr. P4-1 Počáteční stav měřeného vzorku (snímek 0)



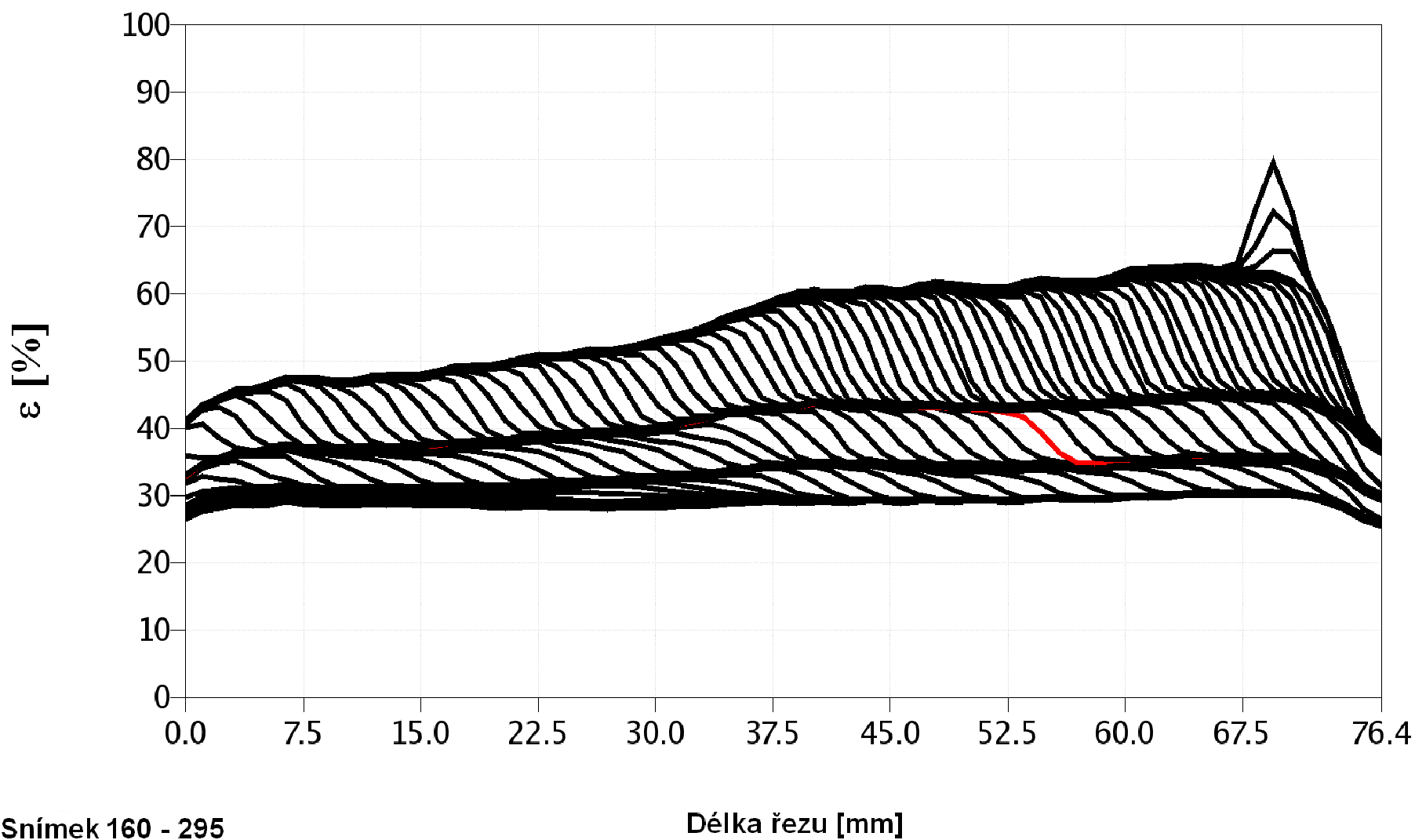
Obr. P4-2 Stav odpovídající $\varepsilon \approx 30\%$ (snímek 160)



Obr. P4-3 Stav odpovídající okamžiku těsně před porušením vzorku (snímek 295)



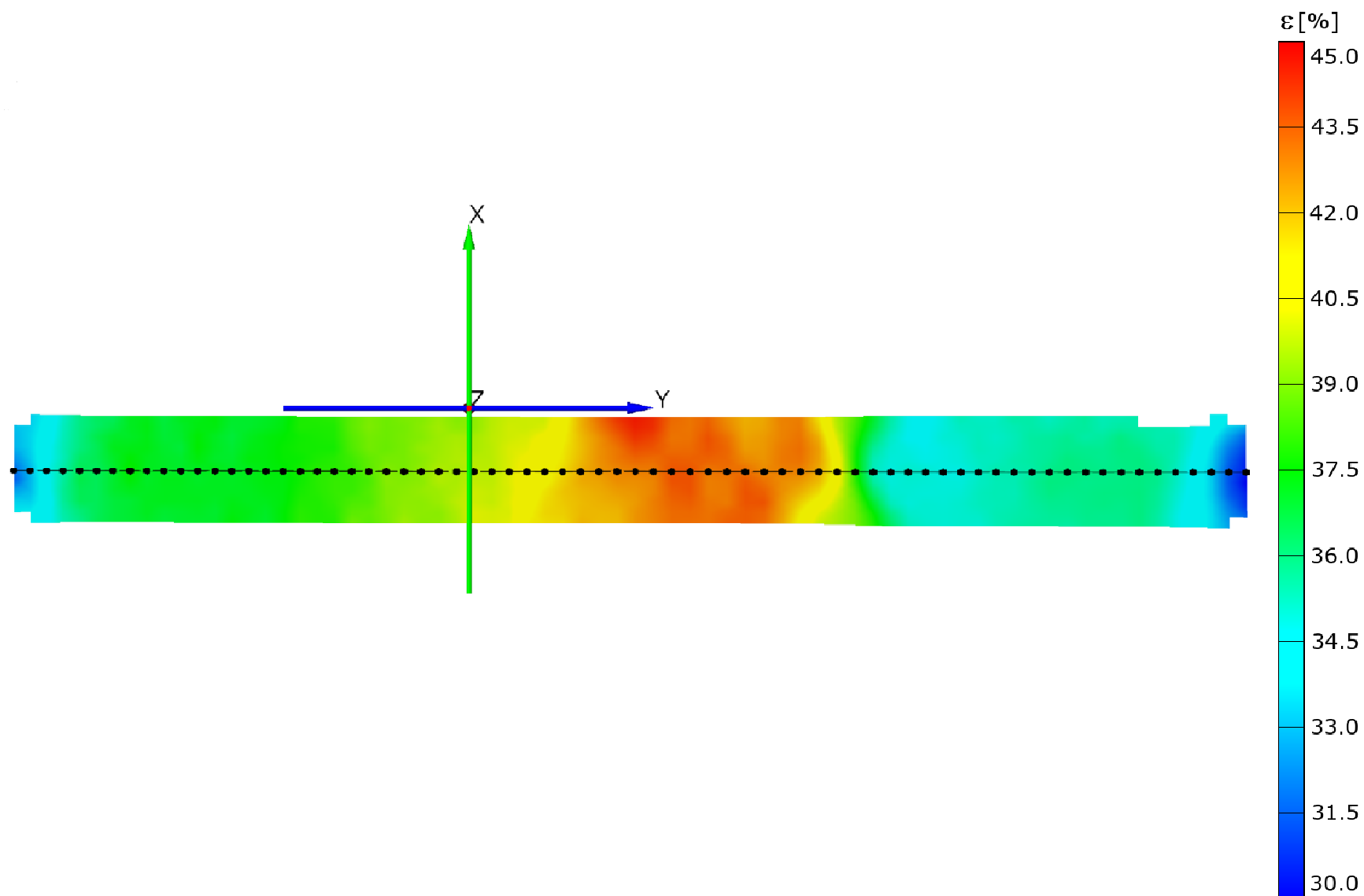
Obr. P4-4 Rozložení ε při $\varepsilon \approx 30\%$ (snímek 160)



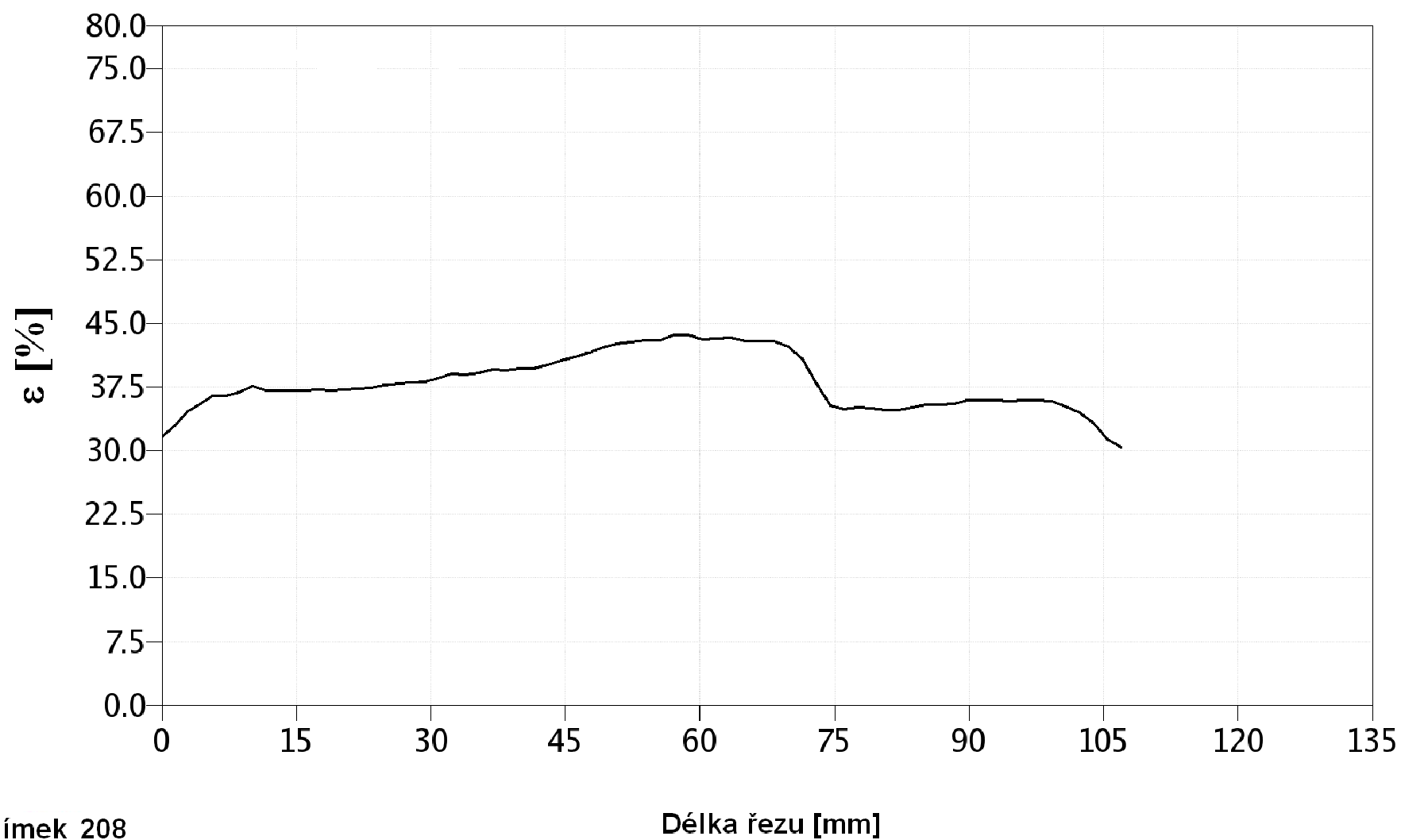
Snímek 160 - 295

Délka řezu [mm]

Obr. P4-5 Rozložení ε od stavu $\varepsilon \approx 30\%$ do porušení materiálu (snímky 160 ÷ 295)



Obr. P4-6 Snímek detailnějšího rozložení ε při průchodu „vlny“ (snímek 208)



Snímek 208

Délka řezu [mm]

Obr. P4-7 Rozložení ε pro snímek 208



Hodnoty posunutí křivky zpevnění φ_0 materiálu
TWIP 1200
(Příloha č. 5)



| Směr odebrání vzorků: 0° | φ_0 [-] | |
|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Rychlost deformace | $\varphi \in <10;20>\%$ | $\varphi \in <5\%; R_m>$ |
| 1 mm/min | $0,0354 \pm 0,0016$ | $0,0353 \pm 0,0006$ |
| 10 mm/min | $0,0346 \pm 0,0010$ | $0,0350 \pm 0,0016$ |
| 600 mm/min | $0,0298 \pm 0,0011$ | $0,0297 \pm 0,0011$ |

| Směr odebrání vzorků: 45° | φ_0 [-] | |
|------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Rychlost deformace | $\varphi \in <10;20>\%$ | $\varphi \in <5\%; R_m>$ |
| 1 mm/min | $0,0364 \pm 0,0010$ | $0,0375 \pm 0,0016$ |
| 10 mm/min | $0,0364 \pm 0,0011$ | $0,0388 \pm 0,0013$ |
| 600 mm/min | $0,0320 \pm 0,0007$ | $0,0326 \pm 0,0004$ |

| Směr odebrání vzorků: 90° | φ_0 [-] | |
|------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Rychlost deformace | $\varphi \in <10;20>\%$ | $\varphi \in <5\%; R_m>$ |
| 1 mm/min | $0,0367 \pm 0,0005$ | $0,0389 \pm 0,0011$ |
| 10 mm/min | $0,0365 \pm 0,0013$ | $0,0382 \pm 0,0018$ |
| 600 mm/min | $0,0388 \pm$ | $0,0401 \pm 0,0007$ |



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé doktorské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací se svým školitelem disertační práce.

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my dissertation in full, in particular Section 60, School Work.

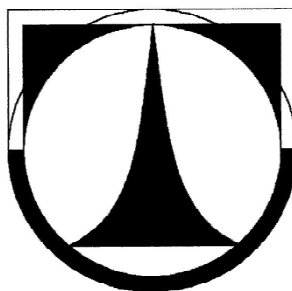
I am fully aware that Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my dissertation for the internal purposes of TUL.

If I use my dissertation or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my dissertation to the full amount.

I compiled the dissertation on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the dissertation.

Datum / Date: 10.11.2008

Podpis/Signature:



**Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů**

**Hodnocení mechanických vlastností nových
vysokopevnostních materiálů**

**The Evaluation of Mechanical Properties of New High-
strength Materials**

Ing. Jiří Sobotka

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE



Zaměření: Tváření kovů

Školitel: doc. Ing. Mirko Král, CSc.

Předložená doktorská práce byla vypracována v rámci doktorského studia na Katedře strojírenské technologie, Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci.

Doktorand: **Ing. Jiří Sobotka**
Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Školitel: **doc. Ing. Mirko Král, CSc.**
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní
Ústav strojírenské technologie

Oponenti:

| | |
|--------------------------------------|---|
| prof. Ing. Jan Suchánek, CSc. | České vysoké učení technické v Praze |
| doc. Ing. Pavel Rumíšek, CSc. | Vysoké učení technické v Brně |
| doc. Ing. Pavel Vajo, CSc. | Slovenská technická univerzita v Bratislavě |

ISBN 978-80-7372-441-2



Autoreferát disertační práce byl rozeslán dne 3.3.2009.

Obhajoba disertační práce se koná dne 3.3.2009

před komisí pro obhajoby disertačních prací v oboru 2303V002 Strojírenská technologie na Fakultě strojní TU v Liberci od 9:00 hod.

Před obhajobou je možné se s doktorskou prací seznámit na děkanátě Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci, Studentská 2, 461 17 Liberec 1.

Anotace

Téma práce: Hodnocení mechanických vlastností nových vysokopevnostních materiálů

Disertační práce se zabývá problematikou popsání specifického chování nového typu vysokopevnostního materiálu, který vykazuje tzv. **TWIP** (**TW**inning **I**nduced **P**lasticity) **efekt** – plasticita indukovaná dvojčatěním. Cílem práce je provést měření materiálových charakteristik tohoto materiálu s ohledem na různé podmínky měření, nalézt odpovídající koeficienty aproximačních křivek pro budoucí numerické simulace a zjistit diagramy mezních přetvoření (DMP). Disertační práce tak vytváří základní popis a charakteristiku tohoto zcela nového materiálu. Poskytuje tak nezbytné informace pro další testování a také pro jeho budoucí širší nasazení především ve strojírenském průmyslu. S ohledem na tuto skutečnost je velký prostor věnován možnostem optického měření deformace, které je schopné poskytnout hlubší informace o chování zkoumaného materiálu než běžné testovací metody. Jedná se tedy do určité míry o průkopnickou práci. Tato skutečnost však také přináší jistá omezení a to především s ohledem na počet vzorků, které lze použít pro vlastní měření. Výsledky práce poslouží jako podklad k dalšímu testování TWIP materiálu, mohou být použity při numerické simulaci tvářecích pochodů a v neposlední řadě obeznámí vědeckou veřejnost s novým materiálem, jeho omezeními a možnostmi z hlediska tváření kovů.

Klíčová slova: plastická deformace, dvojčatění, TWIP efekt, zpevnění, DMP

Annotation

Subject of thesis: The Evaluation of Mechanical Properties of New High-strength Materials

The Doctoral Thesis describes the specific behavior of a new type of high-strength material, which displays a so called **TWIP** (**TW**inning **I**nduced **P**lasticity) **effect**. The aim is to measure the material characteristics of this material respecting the different conditions of measurement; to find the corresponding coefficients of approximation curves for future numerical simulation and to establish the Forming Limit Diagrams (FLD). The Doctoral Thesis thus brings a basic description and characteristics of this completely new material. Therefore it presents the necessary information for further testing and its future exploitation mainly in the engineering



industry. Respecting these facts a wide attention is given to the possibilities of optical measurement of strains, which is capable to give us deeper information about the behavior of the tested material than the usual testing methods. This partly pioneering work on the other hand means certain restrictions, mainly in the number of specimens used for the testing itself. The results of the research work will be used as a starting point for further testing of TWIP materials and they may be used for the numerical simulation of deformation processes. Not in the least the scientific community will receive new information about a new material, its limitation and possibilities regarding metal forming.

Keywords: Plastic Deformation, Twinning, TWIP effect, Work Hardening, FLD

OBSAH

| | |
|---|----|
| 1. Úvod..... | 5 |
| 2. Plastická deformace dvojčatěním..... | 6 |
| 3. Ocele vykazující TWIP efekt | 8 |
| 4. Experimentální část..... | 9 |
| 4.1. Charakteristika materiálu TWIP 1200..... | 10 |
| 4.2. Vliv rychlosti deformace na mechanické vlastnosti | 11 |
| 4.3. Sledování deformace pomocí optického systému | 14 |
| 4.4. Určení regresních koeficientů C a n | 16 |
| 4.5. Vliv teplotního cyklu na mechanické vlastnosti..... | 18 |
| 4.6. Vliv technologie přípravy vzorků na následné materiálové vlastnosti..... | 20 |
| 4.7. Diagramy mezních přetvoření (DMP) | 22 |
| 4.7.1. Rozložení deformace podél vzorku | 25 |
| 5. Závěr..... | 26 |
| 6. Seznam použité literatury | 29 |
| 7. Publikační činnost | 31 |



Disertační práce vznikla za podpory výkumného záměru **MŠM 4674788501** a **GAČR 101/07/P113**.

18. Úvod

Evropa se začíná stále více zelenat. Nejedná se pouze o čisté konstatování ohledně stavu životního prostředí na starém kontinentě, ale týká se také určitého pronikání základních principů a myšlenek ohledně **enviromentální politiky**. Slouží jistě ke cti zástupcům evropských zemí sdružených v Evropské unii, že jako jedni z prvních na celé naší modré planetě začali důsledněji prosazovat ochranu životního prostředí na všech úrovních evropské politiky. Obecně lze v současné době říci, že hlavní poptávka je po takových technologiích a materiálech, které dokáží buď snížit energetickou náročnost nebo naopak zvýšit účinnost přeměny jednotlivých druhů energií [1]. Jestliže jsou pak výsledky takovéto snahy nasazeny do výrobního procesu, jejich přínos a využití velmi silně souvisí s počtem výrobků, kde je takováto technologie nebo materiál použit. Tato skutečnost se velice úzce týká zejména **automobilového průmyslu**. V disertační práci se však zaměříme na samotnou hmotnost automobilu a to konkrétně na jeho vlastní skelet – tedy **karoserii**.

V této oblasti existuje v současné době poměrně značný **antagonismus** dvou základních požadavků – snižování hmotnosti karoserie a zvyšování bezpečnosti pasažérů. Výrobci plechů jsou tedy vyvíjeny takové materiály, které vyhovují podmínkám pro snižování hmotnosti karoserie a zároveň svými pevnostními charakteristikami zvyšují bezpečnost pasažérů. Výsledkem takovéto snahy je i zcela nový druh materiálu, který je předmětem zájmu této disertační práce. Jedná se o materiál, který vykazuje tzv. **TWIP efekt** (**TW**innig **I**nduced **P**lasticity) – tedy plasticita



indukovaná dvojčatěním. Obecně lze říci, že základem chování tohoto materiálu je rozvoj plastické deformace dvojčatěním. Označení **TWIP** se potom používá na celou velkou skupinu materiálů, jejichž základem je rozvoj plastických deformací pomocí dvojčatění. **Cílem** disertační práce jsou posléze následující hlavní body:

- Popsání materiálu vykazujícího **TWIP** efekt a jeho charakteristika, jelikož se jedná o zcela nový materiál.
- Proměření jeho základních materiálových charakteristik, především s ohledem na plastickou deformaci a budoucí numerické simulace.
- Vliv rychlosti deformace na vlastnosti materiálu.
- Vliv podmínek testování na vlastnosti materiálu.
- Určení diagramů mezních přetvoření při různých podmínkách testování.
- Možnosti použití optických metod snímání deformace k bližšímu popsání specifického chování materiálu.
- Doporučení pro další výzkum v této oblasti.

19. Plastická deformace dvojčatěním

Plastická deformace dvojčatěním je vedle skluzu druhým hlavním mechanismem plastické deformace. Při dvojčatění však nedochází k posunu jedné části krystalu, ale k přeskupení krystalové mřížky části krystalu. Nová mřížka je tedy symetricky přetvořena vzhledem k původní rovině. Obě mřížky jsou zrcadlově symetrické k rovině označované jako rovina dvojčatění [11]. Základní aspekty procesu dvojčatění jsou shrnuty v tab. 2.1.

Tab. 2.1. Základní aspekty procesu dvojčatění

| Bod číslo | Charakteristika procesu dvojčatění |
|--------------|--|
| | |
| 1 | Krystalová dvojčata se mohou vytvářet již při tuhnutí roztoků nebo tavenin minerálů a solí. Obecně ke dvojčatění mají však tendenci pouze některé druhy plošně centrovaných mřížek. V případě polykrystalů je dvojčatění doprovázeno skluzem. Výsledná plastická deformace je tedy dána vzájemnou kombinací skluzu a dvojčatění . |
| 2 | U hexagonálních typů mřížek (např. Zn) dvojčatění výraznou měrou |



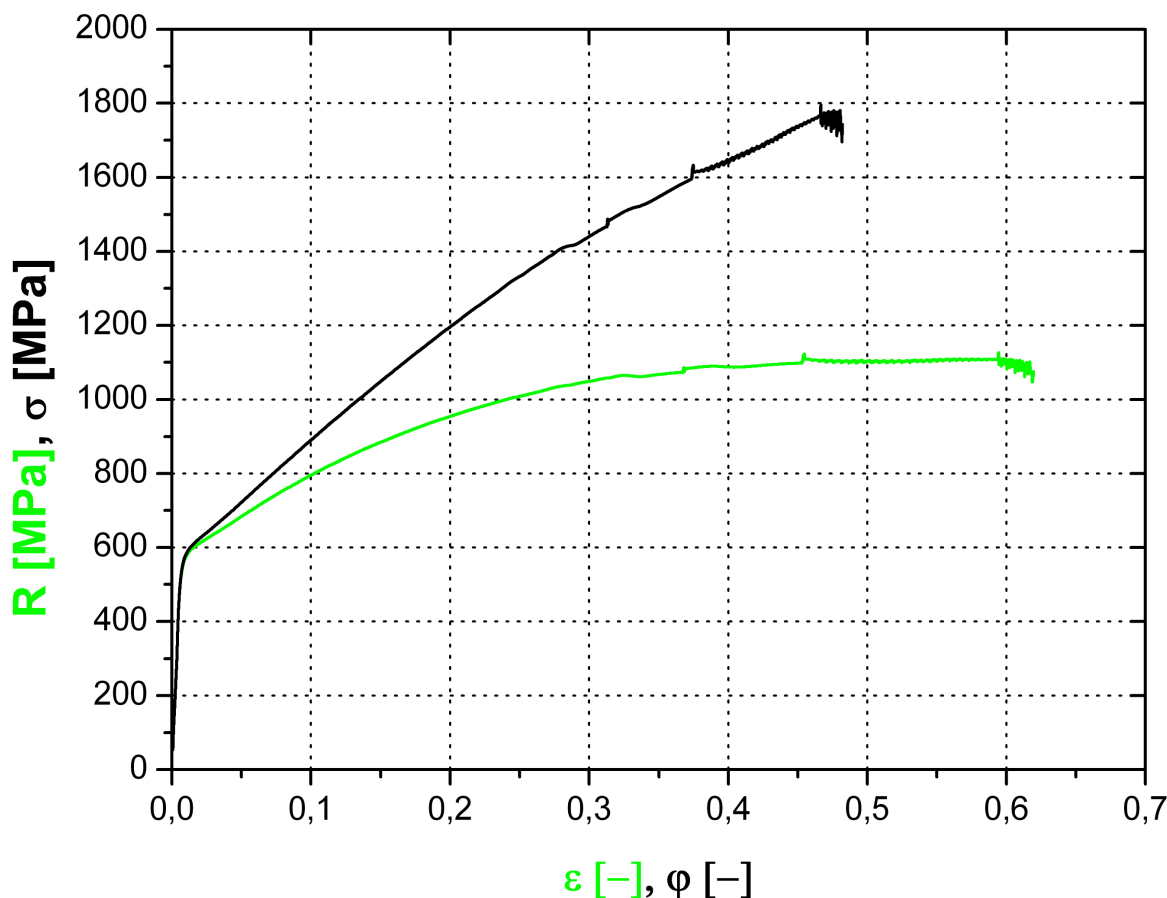
| | |
|----|--|
| | usnadňuje proces plastické deformace skluzem, jelikož proces dvojčatění vede k příznivé orientaci mřížek. |
| 3 | V důsledku působení vnějších sil (tedy za určité koncentrace napětí) dochází k tzv. mechanickému dvojčatění krystalů . Dochází k němu však pouze v určitém systému krystalografických rovin a směrů. Pohyb atomů je malý a výrazně uspořádaný [5]. |
| 4 | K nukleaci dvojčatění je třeba vysokých hodnot napětí. S ohledem na tuto skutečnost proběhne deformace za pokojové teploty téměř vždy skluzem. |
| 5 | Orientace zrn do velké míry rozhoduje o výsledném mechanismu deformace (skluz nebo dvojčatění a to i pro lokální oblast zrna), ale také o kinetice různých typů transformace. Dvojčatění tedy může být velmi výrazně ovlivněno buď orientací krystalů a nebo velikostí napětí působícího na materiál, jelikož zvyšování tohoto napětí může vyvolávat dvojčatění také v zrnech, která původně preferovala deformaci skluzem [15]. |
| 6 | Snížením energie vrstevné chyby (SFE) lze vyvolat proces dvojčatění (v kombinaci se skluzem) také za pokojové teploty. Tento jev se obecně nazývá jako tzv. TWIP efekt (T Wining I nduced P lasticity). |
| 7 | Výrazným znakem po tepelném zpracování žíháním je vznik tzv. žíhacích dvojčat. Jedná se o určité rovné pásy vyskytující se napříč zrny. Velký rozdíl je však v samotné podstatě dvojčat. Žíhací dvojčata svým vznikem předchází procesu plastické deformace. |
| 8 | Dvojčatění představuje natočení jedné části krystalu vůči druhé kolem roviny dvojčatění – nastává zrcadlový obraz (viz obr. 3.5.). Převládá představa, že tento děj probíhá v jednotlivých vrstvách sice postupně, ale velmi rychle. Výsledně lze tedy hovořit o lavinovitém skluzu. Ve skutečnosti tvorbu dvojčat (např. u Pb) doprovází akustická vlna a nebo se na křivce zpevnění objevují výrazné „zuby“. |
| 9 | Vzniklé dvojče vytváří velmi silnou překážku pohybu dislokací, což může ve svém důsledku (při nahromadění dislokací) vyvolat vznik trhliny. Obdobně však může trhlina vzniknout také při průniku dvojčat. |
| 10 | Výpočet kritického napětí při dvojčatění na základě teoretických znalostí o dvojčatění stále nepřináší uspokojivé výsledky. Snaha vědců se v poslední době koncentruje na přístup s využitím znalostí o energii vrstevné chyby a energii rovinné chyby (GPFE - G eneralized P lanar F ault E nergy) [14]. |



| | |
|----|---|
| 11 | V austenitických ocelích prvky (Mn nebo Ni) stabilizují austenit a vytváří tak velmi výhodné vlastnosti těchto ocelí, které jsou obecně dosaženy pomocí kombinace nejenom deformace skluzem a dvojčatěním, ale také martenzitickou přeměnou indukovanou deformací (TRIP a TWIP ocele). Výsledná struktura takovýchto materiálů pak může být poměrně komplikovaná, což poněkud ztěžuje její metalografické popsání. |
| 12 | Proces mechanického dvojčatění v materiálu a vytváření stále nových dvojčat velmi výrazně omezuje pohyb dislokací v materiálu, což ve svém důsledku vede k velmi výraznému zpevňování daného materiálu [16]. Modelování tohoto jevu pomocí fyziky pevné fáze je v posledních letech předmětem velkého zájmu badatelů na celém světě. Obecný přístup k této problematice je pomocí tzv. střední volné dráhy dislokací MFP (Mean Free Path of Dislocations) a její redukci během procesu dvojčatění [17, 18]. |
| 13 | Charakteristické tvary dvojčat jsou dobře rozeznatelné jak pomocí světelné mikroskopie, tak také díky elektronové mikroskopii . Tato je však schopna také osvětlit základní charakter pásů dvojčat v materiálu. Tedy, že se spíše jedná o nahromaděné vrstvy mikrodvojčat (viz kap. 7.2.3.), jejichž tloušťka hraje velmi důležitou roli pro modelování TWIP efektu. |

20. Ocele vykazující TWIP efekt

Materiál označovaný jako **TWIP** (**T**Winning **I**nduced **P**lasticity) je jednou z novinek, která vyplývá z požadavků zpracovatelů plechů na materiály o vysokých hodnotách pevnosti a tažnosti spolu s nízkou měrnou hmotností. Takovéto materiály obsahují prvky stabilizující austenit (převážně **Mn** nebo méně často **Ni**) a vykazují velmi nízkou energii vrstevné chyby (**SFE** – **S**tacking **F**ault **E**nergy) za pokojové teploty. V důsledku této skutečnosti nastává v materiálu mechanické dvojčatění spolu se zvyšující se deformací, které probíhá zároveň s deformací skluzem. Dochází k tzv. **TWIP efektu** – plasticita indukovaná dvojčatěním [30]. Ohromný zájem zpracovatelů plechů (převážně v automobilovém průmyslu) o snížení energie vrstevné chyby materiálu spočívá ve schopnosti takovýchto materiálů dosahovat výborné tažnosti (**A_x**), vysokých pevnostních hodnot (**R_{p0,2}** a **R_m**) a exponentu deformačního zpevnění **n**. Neobvykle vysoké hodnoty tažnosti v kombinaci s mechanickými hodnotami jsou tedy zajištěny silným dvojčatěním v austenitické matici během deformace. Na obr. 3.1. je ukázka zkoušky tahem pro materiál označený **TWIP 1200** (vzorek 0-5).



Obr. 3.1. Ukázka zkoušky tahem (R - ϵ , σ - ϕ) pro TWIP materiál

21. Experimentální část

Hlavním cílem předkládané disertační práce je podat přehled o vlastnostech a chování nového vysokopevnostního materiálu, který vykazuje tzv. **TWIP** (TWinning Induced Plasticity) **efekt**. S ohledem na obecné možnosti tohoto materiálu, které jsou v současné době poměrně neobjasněné, představuje toto charakterizování velmi širokou oblast, která je nad rámec jedné disertační práce. Nejen z tohoto důvodu, ale také v souvislosti s neuspokojivými znalostmi v oblasti tváření materiálu TWIP a v neposlední řadě i vzhledem ke zkušenostem, znalostem a možnostem Katedry strojírenské technologie, je práce nakonec zaměřena zejména na dvě hlavní oblasti:

3) V první řadě se jedná o získání materiálových charakteristik daného materiálu.

Vypracování metodiky určování materiálových konstant dle získaných

výsledků a popsání chování testovaného materiálu za různých podmínek měření. Na základě naměřených hodnot provést srovnání tohoto materiálu vzhledem k ostatním materiálům používaným v současné době především v automobilovém průmyslu.

- 4) Druhou hlavní charakteristikou a také problematikou, která dokáže objasnit hranice použitelnosti testovaného materiálu, jsou DMP. Je cílem stanovit DMP nejen za normálních podmínek testování, ale s ohledem na vyvinuté zařízení na Katedře strojírenské technologie také určit DMP za vyšších rychlostí tažníku odpovídající crash testům.

V posledních letech dochází ke značnému rozvoji v možnostech sledování a charakterizování procesu deformace materiálů pomocí optických snímacích metod. S ohledem na zaměření této disertační práce je tedy jednou z vhodných metod nejenom jak popsat chování testovaného materiálu, ale také jak verifikovat a upřesnit výsledky obou hlavních cílů a provázat je mezi sebou, využití těchto optických systémů. Tento aspekt však vyžaduje pochopení principu nejenom při samotném snímání měřeného objektu, ale také porozumění zpracování a následnému vyhodnocení zjištěných hodnot. Provázat oba hlavní sledované cíle pomocí optických systémů je dalším cílem této disertační práce.

Z tohoto důvodu byl v experimentální části využit systém **ARAMIS – v6.1.1-2**, který umožňoval měření deformace v průběhu celé statické zkoušky tahem. Bylo tedy možné poznat chování materiálu **TWIP 1200** v celém průběhu zatěžování.

V případě zjišťování DMP se naopak ukázalo jako velmi vhodné (pro zjištění rozložení přetvoření na vzorcích) použít optický systém **ARGUS – v6.1.0-5**, který vyhodnocuje pouze koncový stav měřeného vzorku.

21.1. Charakteristika materiálu TWIP 1200

Předmětem experimentálního měření byla austenitická ocel spadající pod obecnou skupinu materiálů označovaných jako **TWIP** ocele. Výrobcem tohoto materiálu je **ArcelorMittal** a pro svoje mechanické vlastnosti je v této práci označován jako **TWIP 1200**. Základním znakem této austenitické ocele Fe-Mn-C (nebo Fe-19wt.%Mn-0.6wt.%C) je nízká energie vrstevné chyby (**SFE**) za pokojové teploty. Chemické složení testovaného materiálu je následně uvedeno v tab. 4.1.



V současné době však nejsou k dispozici téměř žádná přesná data ohledně velikosti této energie. Remy a Ponesu změřili, že pro Fe-20Mn-4Cr-0.5C je velikost SFE okolo 11 mJ/m^2 (za pokojové teploty). Přítomnost Mn poté především stabilizuje γ -fázi. Je-li v materiálu přítomno více než 20% Mn, dochází však ke zvýšení SFE. Stejná závislost platí i pro C. Naproti tomu přítomnost Cr SFE snižuje. Platí však, že změna $d\text{SFE}/dC$ je nejméně o dva řády větší než $d\text{SFE}/dMn$ a $d\text{SFE}/dCr$. Udržení nízké SFE spočívá tedy především v nízkém obsahu C. Velikost SFE určuje mechanismus deformace austenitické ocele. Nízká hodnota SFE podporuje mechanické dvojčatění, které probíhá spolu se skluzem dislokací.

Jedná se tedy o plně austenitickou a nemagnetickou ocel, kde neprobíhá žádná fázová přeměna. Tento materiál vykazuje jak vysoké hodnoty pevnosti, tak velkou tažnost. Tato skutečnost je dána především díky mimořádně velkému exponentu deformačního zpevnění. Předpokládá se, že vznik dvojčete zvyšuje hodnotu zpevnění materiálu díky svému působení na pohyb dislokací. Dvojče totiž působí jako velmi silná překážka (stejná jako např. hranice zrn) vůči tomuto pohybu. Vznikem dvojčat dochází ke snižování volné dráhy pohybu dislokací (**MFP** - **Mean Free Path of Dislocations**). Toto výrazné zpevnění materiálu následně umožňuje docílit protváření velkého objemu materiálu před vytvořením krčku. Tento zpevňující efekt díky mechanickému dvojčatění bývá v literatuře označován jako plasticita indukovaná dvojčatěním (**T**Wining **I**nduced **P**lasticity – **TWIP**).

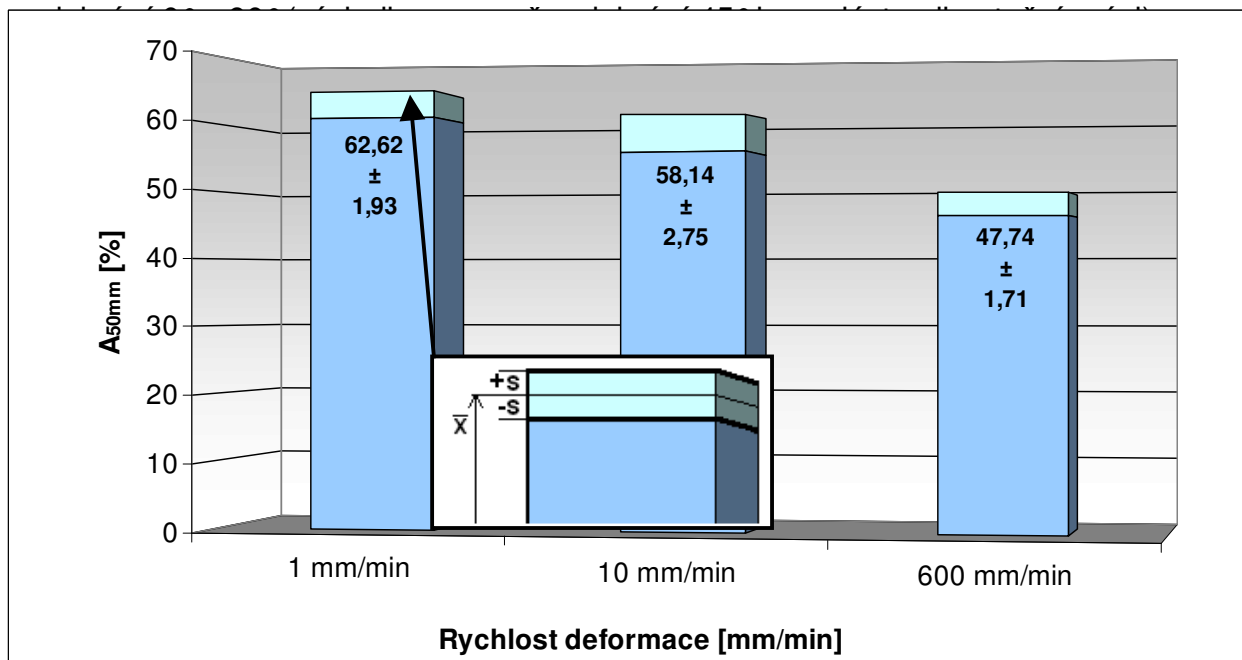
Metalografické hodnocení základní struktury před a po deformaci bylo (vzhledem ke značné neznalosti tohoto materiálu) velmi obtížné. V zahraničí provedené studie pomocí optického mikroskopu popisují strukturu po deformaci jako tzv. „žebříkovitý“ vzor (**ladder-like pattern**). Vlastní snímky struktury lze pak nalézt v disertační práci.

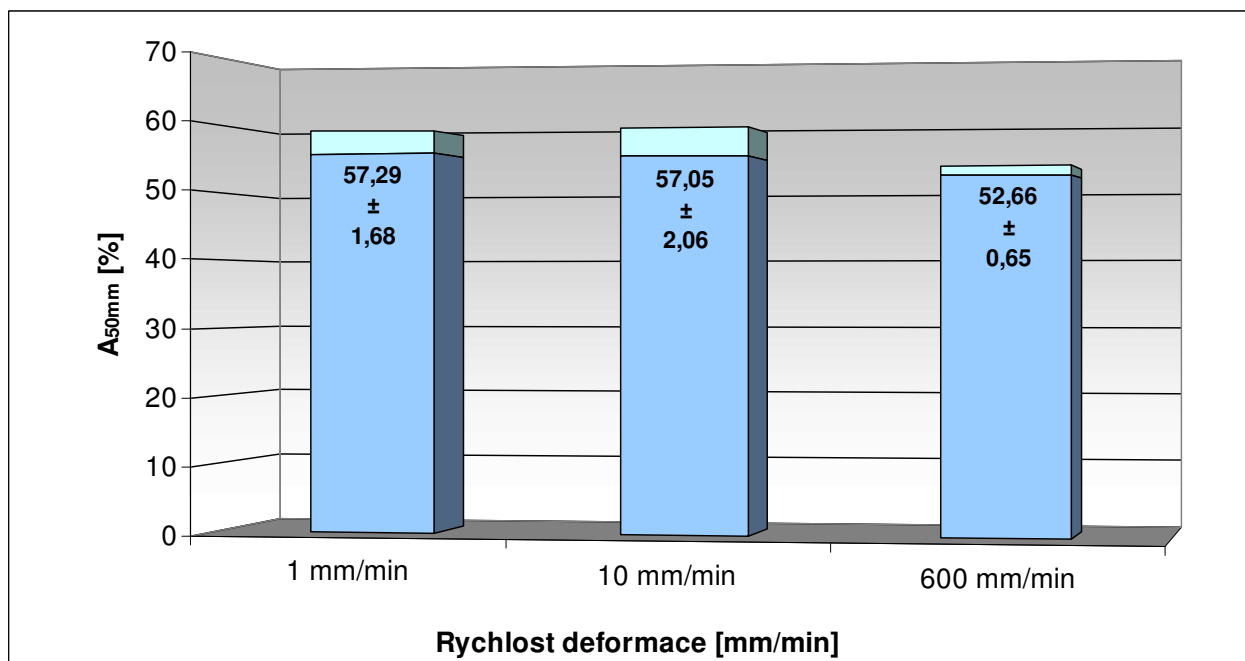
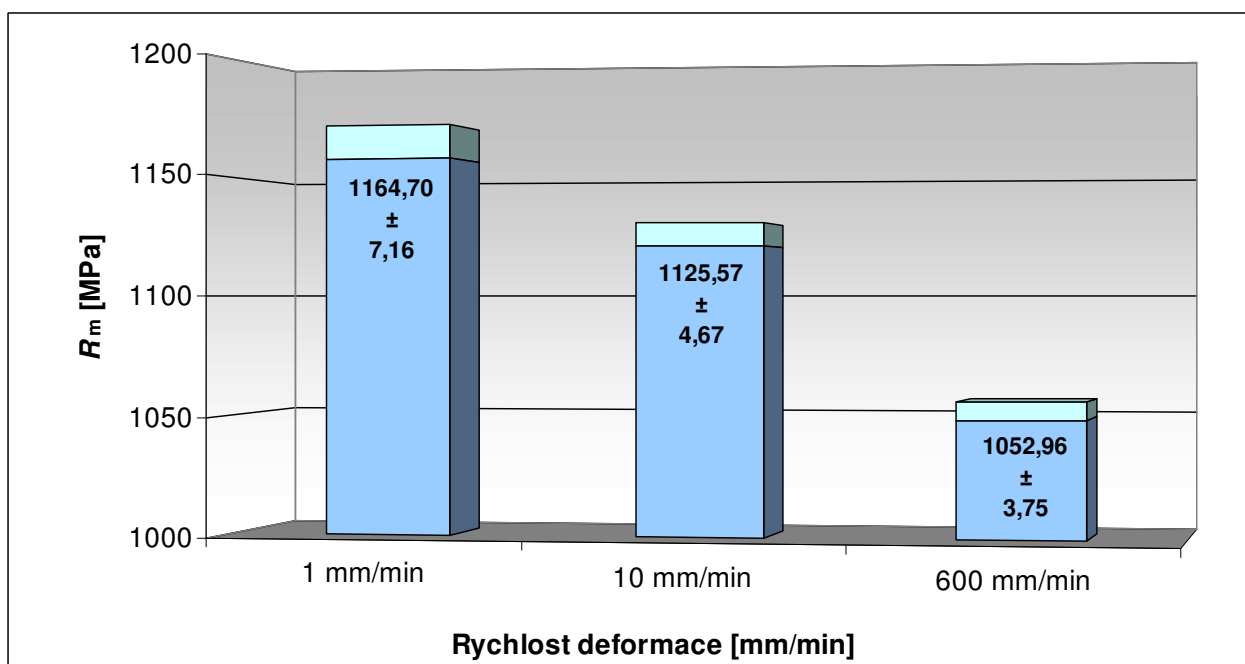
Tab. 4.1. Chemické složení materiálu **TWIP 1200**

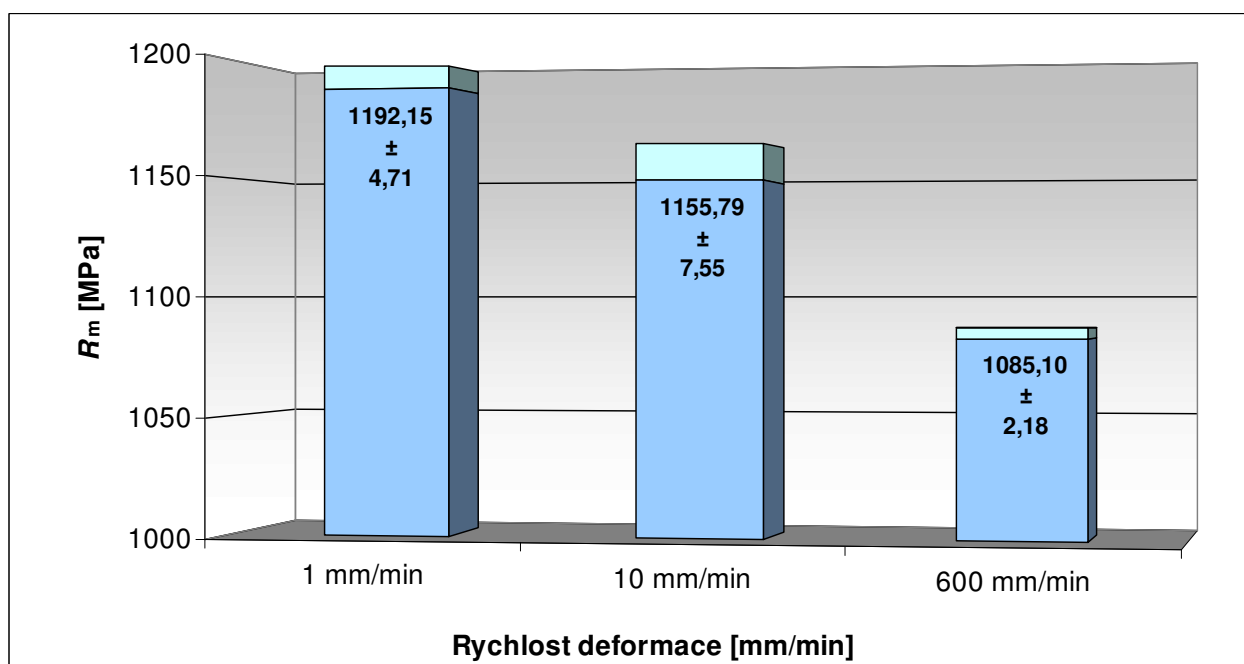
| Prvek | C | Si | M n | P | S | Cr | M o | Ni | V | W |
|---------|------|------|--------|-------|-------|------|--------|------|-----|------|
| [max %] | 0,62 | 0,19 | 19,0 | 0,022 | 0,018 | 0,34 | 0,04 | 0,06 | 0,3 | 0,18 |

21.2. Vliv rychlosti deformace na mechanické vlastnosti

Pomocí statické zkoušky tahem byl sledován vliv rychlosti deformace na mechanické vlastnosti zkoumaného materiálu. Byly zvoleny následující rychlosti deformace: $v_{c1} = 1 \text{ mm/min}$, $v_{c2} = 10 \text{ mm/min}$ a $v_{c3} = 600 \text{ mm/min}$. Na následujících stránkách jsou pomocí tabulek a grafů zobrazeny závislosti mechanických hodnot materiálu TWIP 1200 na deformační rychlosti. Jedná se o výsledky pro směry



**Obr. 4.1.** Graf hodnot tažnosti A_{50mm} pro směr odebrání vzorků 0° **Obr. 4.2.** Graf hodnot tažnosti A_{50mm} pro směr odebrání vzorků 90° **Obr. 4.3.** Graf hodnot meze pevnosti R_m pro směr odebrání vzorků 0°



Obr. 4.4. Graf hodnot meze pevnosti R_m pro směr odebrání vzorků 90°

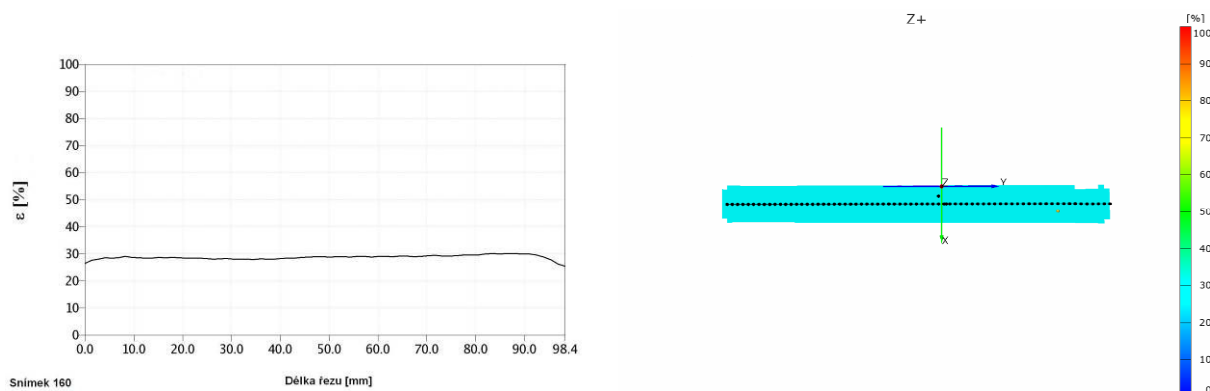
Dosažené pevnostní charakteristiky materiálu dokládají jeho velmi vysokou pevnost. Mez kluzu $R_{p0,2}$ dosahuje hodnot kolem **590 MPa** (viz disertační práce) a mez pevnosti R_m přesahuje hranici **1100 MPa**, což odpovídá vysokopevnostním materiálům. Hodnota tažnosti A_{50mm} se však zcela vymyká z této skupiny materiálů. V závislosti na rychlosti deformace se pohybuje mezi **50÷60%**, což jsou hodnoty typické pro hlubokotažné materiály. Podle naměřených výsledků existuje nepřímá úměra mezi rychlostí deformace a tažností A_{50mm} .

21.3. Sledování deformace pomocí optického systému

V září 2008 byl na Katedru strojírenské technologie zakoupen jeden z optických měřících systémů firmy **GOM**. Konkrétně se jedná o systém **ARAMIS – v6.1.1-2**, což je zařízení umožňující bezkontaktní měření deformace [40]. Jelikož se jedná o zcela odlišný přístup k popsání chování materiálu během deformace než je běžné při statické zkoušce tahem a také vzhledem k zaměření této práce, jevílo se jako velmi výhodné (i přes malou zkušenost při práci s tímto systémem) provést měření materiálu TWIP 1200 také pomocí tohoto systému.

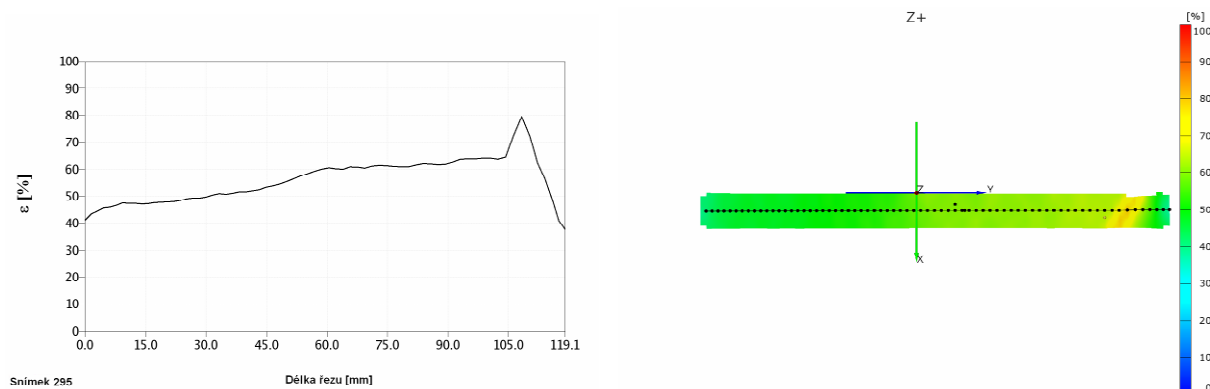
Provedené měření vykazovalo velmi zajímavé výsledky s ohledem na průběh deformace testovaného materiálu. Pomocí následujících snímků lze poměrně

výhodně charakterizovat chování materiálu TWIP 1200 při tahovém namáhání. Obrázky vždy obsahují rozložení deformace podél osy vzorku (vlevo) a na celé měřené ploše vzorku (vpravo). První dvojice snímků je pro stav, kdy $\varepsilon \approx 30\%$.



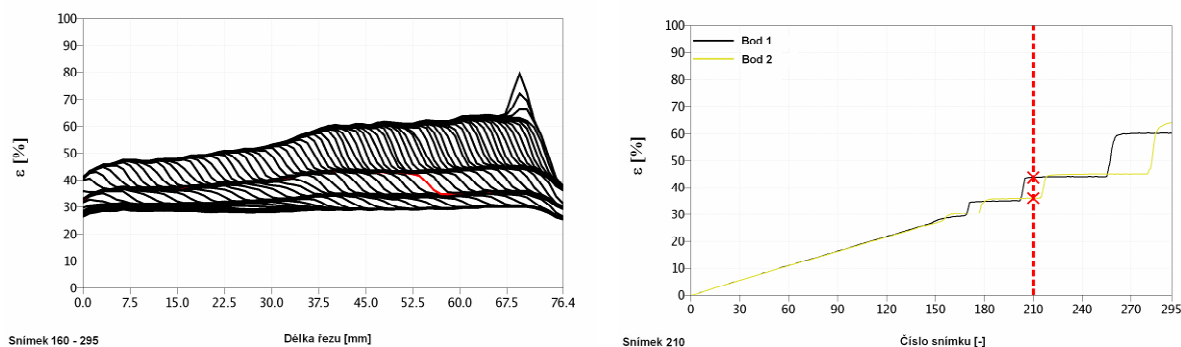
Obr. 4.5. Snímky při relativním prodloužení $\varepsilon \approx 30\%$

Ukazuje se, že i když je poměrné prodloužení již cca $\varepsilon \approx 30\%$, rozložení deformace po celé ploše měřeného vzorku je homogenní. Další dvojice snímků zobrazuje stav těsně před porušením zkoušeného materiálu.



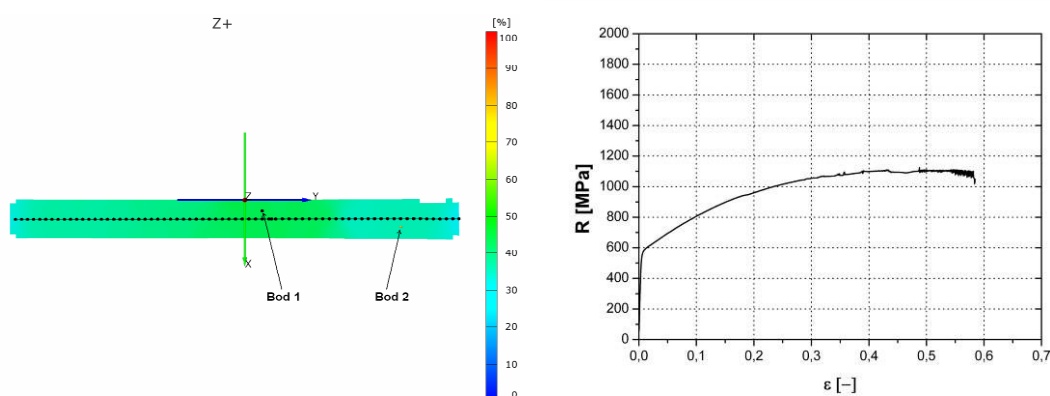
Obr. 4.6. Snímky těsně před lomem materiálu ($\varepsilon \approx 60\%$)

V okamžiku porušení materiálu je v daném místě určitá lokalizace napětí o špičce poměrného prodloužení $\varepsilon > 75\%$. K této lokalizaci deformace však dochází až v samotném závěru měření a ve zbývající části vzorku je spíše stále homogenní deformace ($\varepsilon = 50 - 60\%$). K zajímavému poznání dochází při bližším zaměření na průběh deformace vzorku mezi těmito hranicemi (**$\varepsilon = 30\%$ až lom materiálu**), což je vidět na obr. 4.7. vlevo (snímek 210 je zobrazen červenou barvou). Pro lepší přehlednost je na stejném obrázku vpravo znázorněno ε dvou náhodně vybraných bodů (snímek 210 je opět zobrazen červenou barvou).



Obr. 4.7. Rozložení ϵ při $\epsilon \in <30\%; R_m>$ a jeho průběh pro dva body

K pochopení výše zaznamenaného chování je vhodné zde také vykreslit záznam z klasické zkoušky tahem, který je typický pro materiál TWIP 1200. Tento záznam je spolu s grafickým rozložením poměrného prodloužení pro snímek 210 na obr. 4.8.



Obr. 4.8. Rozložení ϵ pro snímek 210 a záznam ze zkoušky tahem

V intervalu $\epsilon \in <30; 60>\%$ jakoby materiálem při zvětšující se deformaci probíhají postupně určité „vlny“, které vždy navýší hodnotu přetvoření o stále větší a větší hodnotu. V záznamu tahové zkoušky toto chování cca od $\epsilon \approx 30\%$ způsobuje neustále se zvětšující „rozkmítávání“ přiloženého snímače síly. Tato skutečnost tak potvrzuje předpoklad postupných vytváření dvojčat, které umožní protváření celého objemu materiálu a dosažení tak velké tažnosti při velkých pevnostních hodnotách.

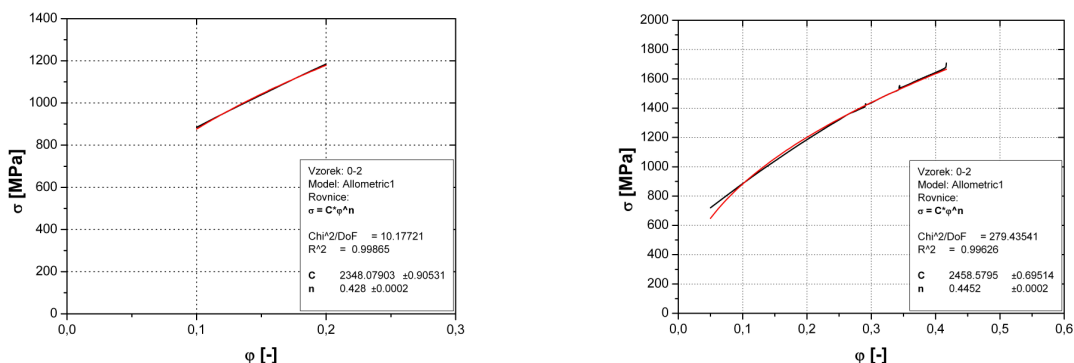
21.4. Určení regresních koeficientů C a n

Dalším krokem k popsání zkoumaného materiálu TWIP 1200 bylo nalezení koeficientů aproximační křivky dle Swift-Krupkovského:

$$\sigma = C\varphi^n \text{ [MPa]} \quad (80)$$

kde: C - modul monotónního zpevnění [MPa]
 n - exponent deformačního zpevnění [-]

K aproximaci byly vybrány následující dva intervaly $\varphi \in <10;20>\%$ a $\varphi \in <5\%;R_m>$. Na následující dvojici obrázků je vždy původní naměřená křivka označena černou barvou a získaná aproximační křivka má barvu červenou. Je tedy dobře vidět, do jaké míry odpovídá aproximace skutečnosti. O míře přiblížení skutečnosti vypovídá také koeficient spolehlivosti R . Nalezené hodnoty modulu monotónního zpevnění C a exponentu deformačního zpevnění n jsou vždy v pravém rohu grafů.



Obr. 4.9. Aproximace křivky zpevnění pro interval $\varphi \in <10;20>\%$ a $\varphi \in <5\%;R_m>$

Tab. 4.2. Hodnoty regresních koeficientů C a n materiálu TWIP 1200 pro směr 0°

| Podmínky měření | | Rychlost deformace [mm/min] a $\varphi \in <10;20>\%$ | | | Rychlost deformace [mm/min] a $\varphi \in <5\%;R_m>$ | | |
|-----------------|-------|---|--------|--------|---|--------|--------|
| | | 1 | 10 | 600 | 1 | 10 | 600 |
| C | [MPa] | 2458,9 | 2366,4 | 2238,7 | 2574,4 | 2460,1 | 2294,0 |
| n | [-] | 0,441 | 0,428 | 0,412 | 0,455 | 0,442 | 0,418 |

Velikosti koeficientů C a n při aproximaci křivky zpevnění jsou poměrně značně posunuty do vyšších hodnot. Modul monotónního zpevnění dosahuje hodnot kolem **2350 MPa**, exponent deformačního zpevnění se pohybuje v rozmezí **0,42÷0,44**. Všechny hodnoty jsou také nepřímo závislé na zvětšující se rychlosti deformace. Při srovnání obou použitých intervalů se ukázalo, že interval $\varphi \in <5\%;R_m>$ je poněkud méně „přísný“ a hodnoty zjištěné v tomto intervalu jsou vyšší než pro $\varphi \in <10;20>\%$.



21.5. Vliv teplotního cyklu na mechanické vlastnosti

Zjišťování vlivu teplotního cyklu na materiálové charakteristiky testovaného materiálu bylo provedeno pomocí statické zkoušky tahem. Jednalo se o klasický průběh zkoušky dle normy ČSN EN 10002-1. Vzorky pro zkoušku jednoosým tahem byly odebrány ve směru válcování (0°) metodou dělení vodním paprskem s abrazivem. Dodatečná úprava vzorků spočívala v obroušení řezných hran tyček. Statická zkouška tahem byla provedena na stroji TIRAtest 2300 s použitím vyhodnocení naměřených dat pomocí programu Labtest 4.01. Tento programový systém vyhodnocuje všechny základní charakteristiky ($R_{p0,2}$, R_m , A_{50mm}). Počáteční délka měřeného úseku L_0 tedy byla 50 mm (A_{50mm}). K vlastnímu statistickému vyhodnocení bylo použito 5 vzorků. Vlastní teplotní cyklus představoval čas potřebný v lakovně k vytvrzení laku na karoserii automobilu (170°C po dobu 20 min). Z tohoto důvodu je také samotné zpracování teplotním cyklem v této práci označováno jako **BH (Bake Hardening)**.

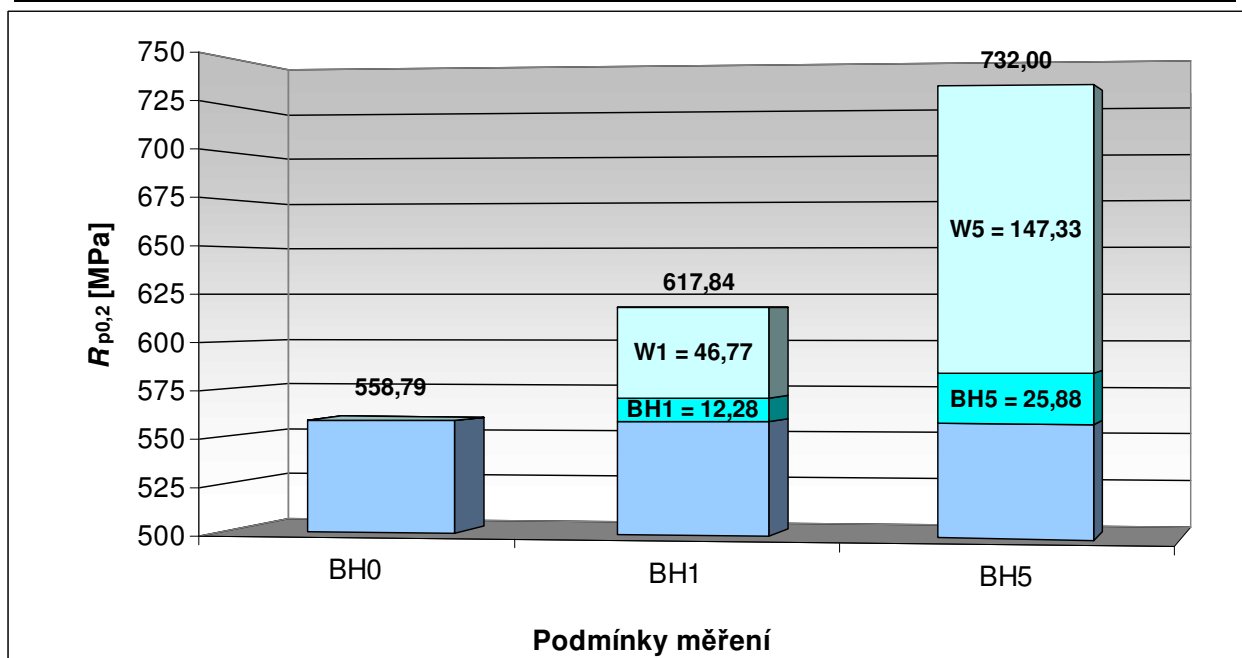
Velikost předdeformace byla volena na základě výsledků statické zkoušky tahem nevytvrzeného materiálu bez předdeformace. Konkrétně se jednalo o hodnoty předdeformace $\varepsilon = 1\%$ a $\varepsilon = 5\%$. Všechny předdeformované vzorky byly podrobeny tepelnému cyklu (170°C a doba 20 min.). Následovalo dolomení vzorků za stejných podmínek. V tab. 4.3. je vysvětleno názvosloví použitých vzorků. Na obr. 4.10. je posléze vidět velikost BH efektu a pracovního zpevnění při různých stavech předdeformace.

Tab. 4.3. Označení vzorků pro měření vlivu BH efektu a předdeformace

| Označení [MPa] | Význam |
|-------------------|--|
| BH0 | Vzorky podrobené pouze teplotnímu cyklu (170° po dobu 20 min) |
| BH1 | Předdeformované vzorky ($\varepsilon = 1\%$) a poté podrobeny teplotnímu cyklu (170° po dobu 20 min) |
| BH5 | Předdeformované vzorky ($\varepsilon = 5\%$) a poté podrobeny teplotnímu cyklu (170° po dobu 20 min) |



| | |
|-----------|---|
| W1 | Pracovní zpevnění při velikosti předdeformace $\varepsilon = 1\%$ |
| W5 | Pracovní zpevnění při velikosti předdeformace $\varepsilon = 5\%$ |



Obr. 4.10. Velikosti BH efektu a pracovního zpevnění při různých stavech předdeformace

Tab. 4.4. Srovnání výsledků ze statické zkoušky tahem a vlivu teplotního cyklu

| Základní mechanické hodnoty | | Směr odebrání vzorků: 0° Rychlost deformace: 10 mm/min | |
|-----------------------------|-------|--|--------------------|
| | | Statická zkouška tahem | BH0 |
| $R_{p0,2}$ | [MPa] | $558,79 \pm 4,94$ | $553,39 \pm 6,65$ |
| R_m | [MPa] | $1125,57 \pm 4,67$ | $1115,73 \pm 9,01$ |
| A_{50mm} | [%] | $58,14 \pm 2,75$ | $59,39 \pm 0,69$ |

Při podrobení teplotnímu cyklu, který svými parametry odpovídá podmínkám během vypalování laku karoserie se prokázalo, že u tohoto materiálu téměř nedochází ke zvyšování meze kluzu $R_{p0,2}$ vlivem tepelného zatížení (BH efekt). Testovaný materiál byl také podroben určitému stupni předdeformace a následně opět teplotně namáhán. Získané výsledky představují velikost pracovního zpevnění

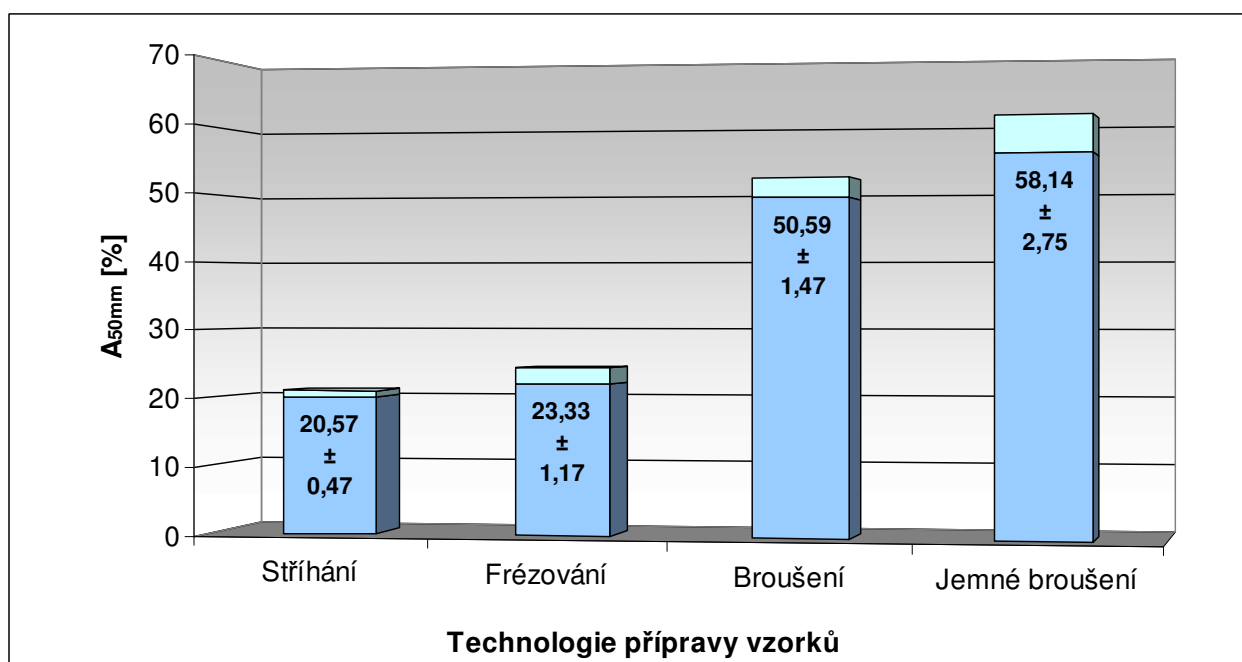
pro obě hodnoty předdeformace ($W1 = 46,77 \text{ MPa}$ a $W5 = 147,33 \text{ MPa}$). Ovlivnění celkové tažnosti $A_{50\text{mm}}$ je dáno pouze velikostí předdeformace – dochází tedy k jejímu snížení cca o 1 resp. 5%. Z hlediska výsledné meze pevnosti R_m po zatížení teplotním cyklem a předdeformací je patrné, že tato změna podmínek nesnižuje jeho velikost ($R_m \approx 1120 \text{ MPa}$).

21.6. Vliv technologie přípravy vzorků na následné materiálové vlastnosti

V průběhu měření a především přípravy vzorků pro statickou zkoušku tahem se dalo vypožorovat, že pro daný materiál a jeho následné mechanické vlastnosti je velmi důležité zvolit správnou technologii přípravy vzorků. Ukázalo se, že běžná technologie stříhání, která se používá např. pro hlubokotažné materiály, je pro materiál TWIP 1200 naprosto nevhodná. Nevyužívá totiž v plné šíři vlastnosti, které zkoumaný materiál poskytuje.

Jevilo se tedy jako vhodné provést měření pomocí statické zkoušky tahem pro vzorky připravené pomocí různých technologií a následné porovnání základních mechanických vlastností těchto vzorků. Byly vybrány tři základní technologie vhodné pro přípravu vzorků, které byly porovnány s technologií řezání vzorků vodním paprskem s následným jemným broušením, která se využívala pro zjišťování všech hodnot při měření statickou zkouškou tahem.

Ná obr. 4.11. je vidět vliv technologie přípravy vzorků na výslednou velikost tažnosti $A_{50\text{mm}}$. Zvolené technologie se celkem vhodně dají rozdělit na dvě hlavní skupiny. První je tvořena **technologemi stříhání a frézování**. Hodnoty tažnosti $A_{50\text{mm}}$ zde dosahují cca pouze 37% výsledků zjištěných pro technologii jemného broušení. Tyto přípravné technologie vnášejí do materiálu poměrně značné množství mikrotrhlin. Druhou hlavní skupinu tvoří **technologie broušení a jemného broušení**. Broušení samotné dosahuje cca 88% hodnoty tažnosti $A_{50\text{mm}}$ pro jemné broušení.

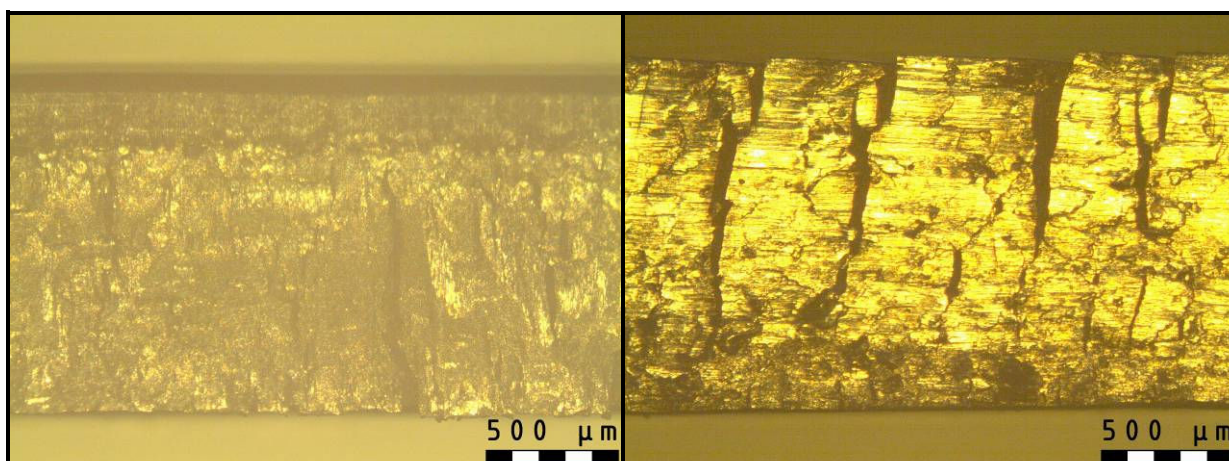


Obr. 4.11. Graf hodnot tažnosti A_{50mm} pro různé technologie přípravy vzorků

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny snímky povrchů lomové (stříhání) a obrobené (frézování, broušení a jemné broušení) plochy jednotlivých vzorků po deformaci vzorků. Je zde patrný velký vliv mikrotrhlin od příslušné technologie.

Stříhání

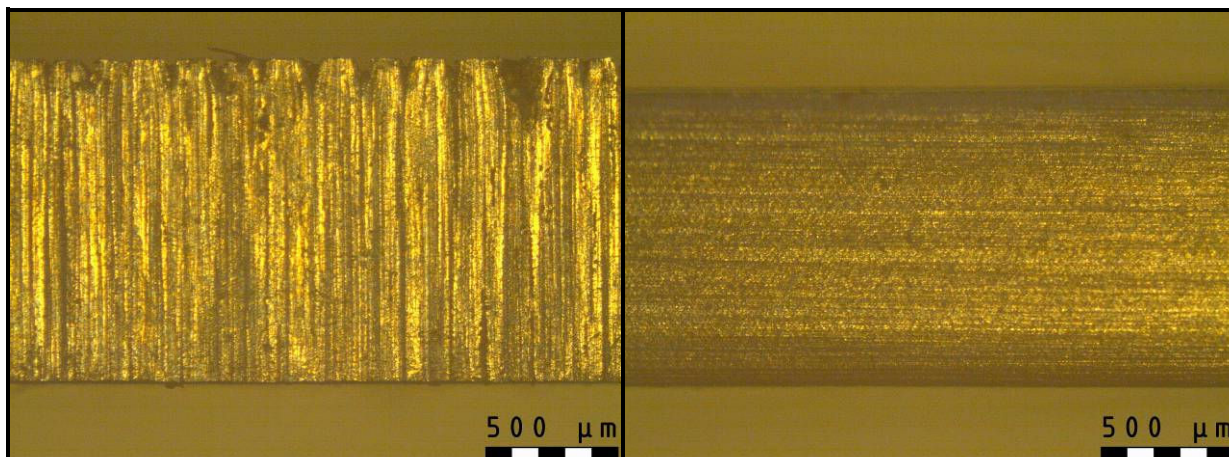
Frézování



Obr. 4.12. Snímky lomové hrany pro technologie stříhání a frézování

Broušení

Jemné broušení



Obr. 4.13. Snímky lomové hrany pro technologie broušení a jemného broušení

Z uvedených výsledků a grafických znázornění je zřejmé, že vezmeme-li porovnání např. s hlubokotažnými materiály, které lze připravovat na nástřihových linkách pomocí technologie stříhání, zde se tato technologie příliš využít nedá. O jistém využití stříhání se dá možná hovořit pouze v případě menšího přetvoření vyráběného dílu (cca do 15%). Zde je však otázkou, jak by se daný materiál choval při provozním zatížení. Obecně sice platí, že velké deformace se vyskytují především dále od hrany polotovaru. Přesto se domnívám, že vzhledem k vysokému počtu mikrotrhlin na povrchu vzorku by výrobek byl poměrně nebezpečný.

21.7. Diagramy mezních přetvoření (DMP)

K vlastnímu měření DMP pro tuto práci bylo nakonec zvoleno nejprve určení DMP za nižší rychlosti ($v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4}$ m/s) a poté zjištění DMP při vyšších rychlostech tažníku. V našem případě se konkrétně jednalo o $v_2 = 17,78$ m/s. Zjišťování DMP za této vyšší rychlosti tažníku probíhalo také s ohledem na předešlou historii tváření daného materiálu. Přesněji se jednalo o předdeformování měřeného vzorku na velikost 1/3 a 2/3 mezního stavu. Mezní stav pro tyto DMP byl určen z hodnot mezního stavu pro DMP zjišťovaný bez vlivu předdeformace.

Tab. 4.5. Označení DMP za různých podmínek měření

| Označení | Význam |
|----------|---|
| FP | Zjišťování DMP „za pomala“ ($v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4}$ m/s) |
| FR | Zjišťování DMP „za rychla“ ($v_2 = 17,78$ m/s) |
| FR 13 | Zjišťování DMP „za rychla“ ($v_2 = 17,78$ m/s) a velikosti předdeformace 1/3 mezního stavu |
| FR 23 | Zjišťování DMP „za rychla“ ($v_2 = 17,78$ m/s) a velikosti předdeformace 2/3 mezního stavu |

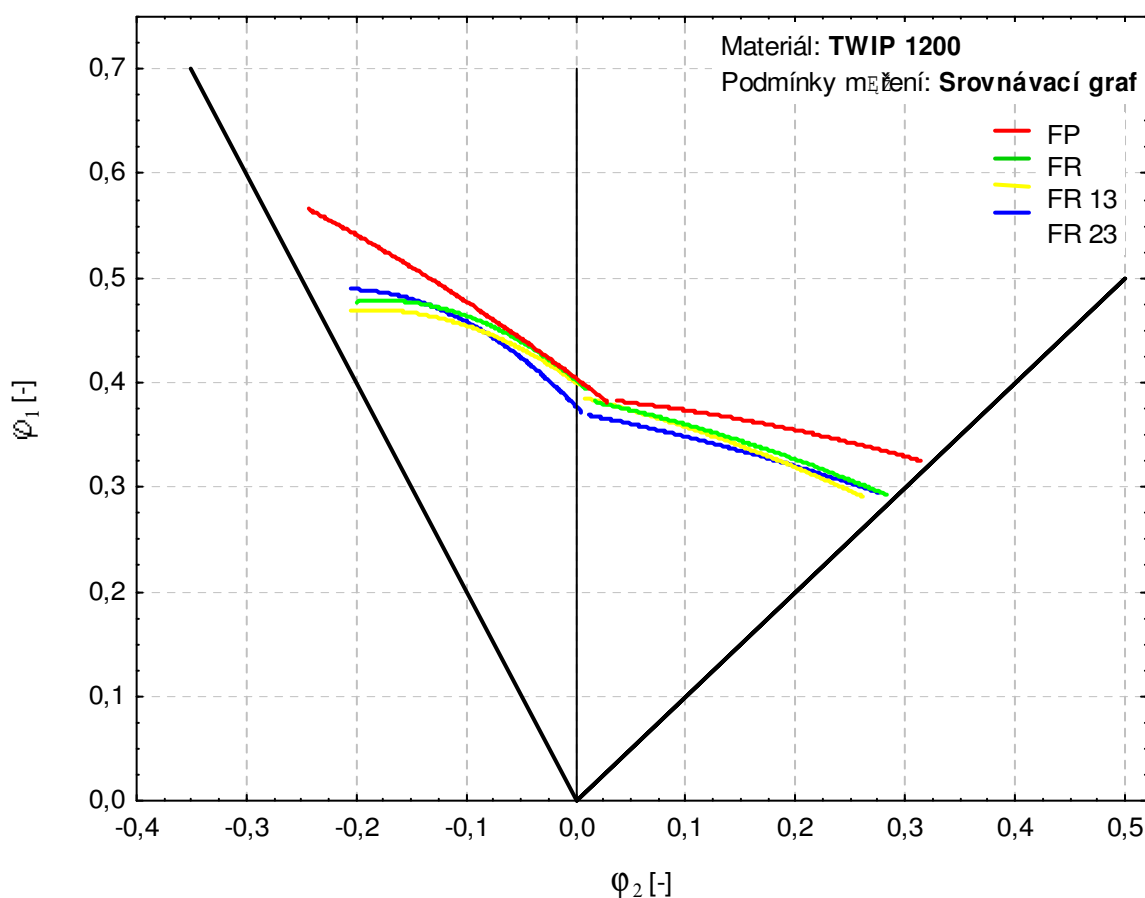
Pro plynulé a homogenní pokrytí všech podmínek přetvoření v DMP je nezbytné použití 13-ti různě tvarovaných vzorků. S ohledem na zaměření této práce a také na množství měřeného materiálu TWIP 1200 bylo potřeba toto číslo poněkud omezit. Bylo vybráno pouze 5 stop (5 stavů napjatosti), což je hodnota, která vzhledem ke zkušenostem naší katedry ještě poměrně velmi dobře dostačuje k relevantnímu



zjištění DMP. Vybrané stopy s nanesenou deformační sítí jsou vidět na obr. 4.14.

Obr. 4.14. Vzorky s nanesenou nedeformovanou sítí

Zjištěné DMP za různých podmínek měření jsou podány na obr. 4.15., který obsahuje KMP za všech podmínek měření.



Obr. 4.15. DMP za všech podmínek měření

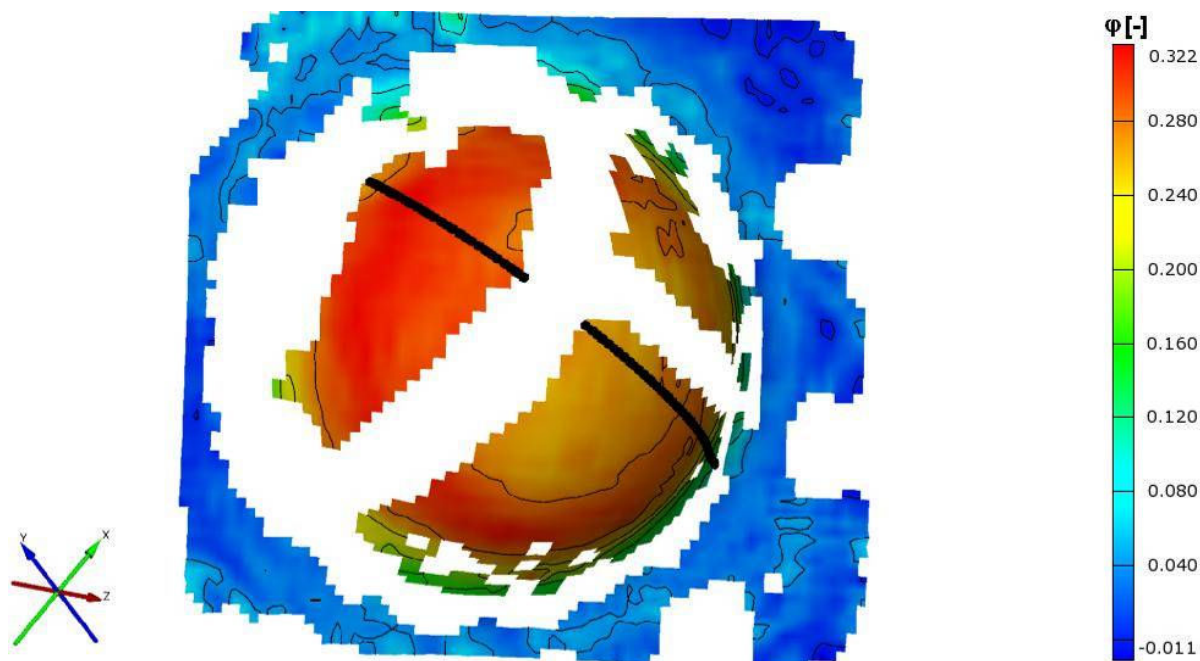
Při podmínkách měření **FP**, kdy rychlost pohybu tažníku byla $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4}$ m/s, je ohraničená bezpečná oblast tváření pro vysokopevnostní materiál značně netypická a to především velkým obsahem svojí plochy.

Výsledky DMP pro vyšší rychlost tažníku ($v_2 = 17,78$ m/s - **FR**) sice vykazují určitý pokles oproti podmínkám **FP**, kdy největšího snížení polohy KMP bylo dosaženo pro oba krajní stavy napjatosti ($m_\phi = -0,5$ a $m_\phi = 1$). Vzhledem k velkému gradientu mezi použitými rychlostmi tažníku ($v_1 = 1,17 \cdot 10^{-5} \cdot v_2$) se však jedná o minimální pokles. Hodnoty v levé části křivky mezních přetvoření (**KMP**) pro všechny tři podmínky měření ($m_\phi = -0,5$) odpovídají hodnotám tažnosti **A_{50mm}** pro vyšší rychlosti deformace. Srovnání KMP za různých podmínek předdeformace ukazuje, že provedená předdeformace téměř neovlivňuje pozici KMP v diagramu. Lze vysledovat drobný pokles KMP při stavu přetvoření $m_\phi = 0$, jeho velikost však není výrazná. Pro stav přetvoření $m_\phi = 1$ jsou KMP pro všechny podmínky (**FR**, **FR 13** a **FR 23**)

téměř totožné. Podle výsledků DMP lze tedy říci, že předdeformace nemá téměř žádný vliv na polohu KMP a vliv změny rychlosti tažení je minimální.

21.7.1. Rozložení deformace podél vzorku

V případě sestrojování DMP pro vysokopevnostní materiály se uvádí, že vysokopevnostní materiály mají mnohem vyšší gradient hlavního přetvoření φ_1 než materiály hlubokotažné. Toto může v důsledku vést ke značnému posunutí KMP ve směru osy φ_1 , jelikož vybrané elementy jsou zasaženy lokálním ztenčením a tedy více deformované než elementy dále od trhliny. Bylo tedy i v této práci snahou nalézt rozložení deformace podél vzorku pro materiál TWIP 1200, který patří do skupiny vysokopevnostních materiálů a potvrdit tedy předpoklad velkého gradientu hlavní deformace v okolí trhliny. Vlastní sledování rozložení přetvoření na vzorcích testovaného materiálu (TWIP 1200) proběhlo ve firmě Škoda Auto a.s. pomocí programu **ARGUS – v6.1.0-5**. Jedná se o zařízení, které snímkováním měřeného objektu vyhodnocuje rozložení deformace [42]. Na obr. 4.16. je vidět rozložení přetvoření na měřeném vrchlíku pomocí logaritmického přetvoření.



Obr. 4.16. Rozložení hlavního přetvoření φ_1 pro materiál **TWIP 1200**



Z výše uvedeného obrázku vyplývají dvě podstatné skutečnosti, které do určité míry již naznačily výsledky ze statické zkoušky tahem. Jedná se nejen o značnou hodnotu maximálního přetvoření, které dosahuje materiál TWIP 1200, ale hlavně o rozložení tohoto přetvoření, které je téměř homogenní po celém vrchlíku a naznačuje tak velké protváření celého objemu materiálu. Tato skutečnost již byla v tahové zkoušce naznačena praktickou shodou homogenní tažnosti A_g s A_{50mm} .

22. Závěr

Předkládaná disertační práce byla vypracována s ohledem na nedostačující znalosti a potřeby vymezení použitelnosti nově vyvíjeného materiálu vykazujícího **TWIP** (TWinning Induced Plasticity – plasticita indukovaná dvojčatěním) **efekt**. Svým chováním a velikostí materiálových charakteristik se však velmi odchyluje od materiálů používaných v průmyslu a jeho zařazení je obtížné. Znalost intervalu použitelnosti z hlediska tváření, vymezení metod měření materiálových charakteristik a obecné podvědomí o tomto materiálu je v současné době velmi nedostačující vzhledem k možnostem a potenciálu, který tento materiál nabízí. S ohledem na předpokládané specifické chování testovaného materiálu se jevílo jako velmi účelné provést verifikaci naměřených základních charakteristik pomocí moderních optických metod sloužících k měření deformací, které by také dokázalo do určité míry propojit obě hlavní složky experimentální části. Velkým omezujícím faktorem pro celou disertační práci bylo malé množství TWIP materiálu.

Prvotní částí testování materiálu TWIP 1200 byla statická zkouška tahem. Ukázalo se, že samotná příprava vzorků je velmi ovlivňujícím faktorem pro úspěšné zkoušení. Vzorky byly řezány vodním paprskem a následně zbaveny drobných nečistot pomocí jemného broušení. Pro testování byly vybrány tři rychlosti deformace (1, 10 a 600 mm/min) pro tři směry odebrání vzorků (0°, 45° a 90°). Stanoveny byly základní mech. vlastnosti ($R_{p0,2}$, R_m a A_{50mm}) a také vliv BH efektu a předdeformace.

Tab. 5.1. Základní mechanické hodnoty materiálu **TWIP 1200** pro směr 0°

| Podmínky měření | | Rychlost deformace [mm/min] | | | Teplotní cyklus a předdeformace | | |
|-----------------|-------|-----------------------------|--------|--------|---------------------------------|--------|--------|
| | | 1 | 10 | 600 | BH0 | BH1 | BH5 |
| $R_{p0,2}$ | [MPa] | 562,34 | 558,79 | 525,34 | 553,39 | 617,84 | 732,00 |



| | | | | | | | |
|------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| R_m | [MPa] | 1164,69 | 1125,56 | 1052,95 | 1115,73 | 1113,22 | 1116,72 |
| A_{50mm} | [%] | 62,69 | 58,14 | 47,74 | 59,39 | 57,87 | 53,66 |
| C | [MPa] | 2458,9 | 2366,4 | 2238,7 | 2336,6 | 2258,2 | 2144,1 |
| | | 2574,4 | 2460,1 | 2294,0 | 2442,1 | 2408,8 | 2263,0 |
| n | [-] | 0,441 | 0,428 | 0,412 | 0,424 | 0,404 | 0,340 |
| | | 0,455 | 0,442 | 0,418 | 0,441 | 0,432 | 0,362 |
| Φ_0 | [-] | 0,0355 | 0,0346 | 0,0298 | 0,0336 | 0,0406 | 0,0427 |
| | | 0,0353 | 0,0350 | 0,0297 | 0,0347 | 0,0432 | 0,0445 |

K nalezení koeficientů aproximace podle Swifta-Krupkovského se musela najít vhodná metodika pomocí programu **OriginPro 7.5**, jelikož dosažené hodnoty se zcela vymykaly běžně používaným hodnotám. Tvar křivek zpevnění vykázal také velmi netradiční chování po dosažení určité velikosti poměrného prodloužení ($\epsilon > 30\%$), kdy začínalo docházet ke stále se zvětšujícímu rozkmitu zatěžující síly F . Bylo tedy nutné nalézt novou metodiku měření testovaného materiálu zkouškou tahem, která by umožnila zobrazit celý proces v jakémkoli okamžiku stavu deformace. Výsledkem bylo použití optického měření deformace pomocí systému **ARAMIS**. Výsledky potvrdily předpoklady průběhu deformace během zkoušky tahem, kdy dochází k postupnému protváření celého objemu materiálu. Průběh deformace ve vybrané oblasti a grafické znázornění samotného postupu této deformace vzorkem patří patrně k nejdůležitějším výsledkům této práce, jelikož umožnily bližší popsání charakteru deformace materiálu.

S ohledem na zkušenosti při hledání vhodné technologie přípravy vzorků pro zkoušky tahem se ukázalo jako velmi vhodné provést proměření a porovnání jednotlivých technologií mezi sebou, především vzhledem k dosažitelným velikostem tažnosti. Tímto způsobem byl potvrzen velký vliv samotné volby přípravné technologie na výsledné materiálové charakteristiky materiálu.

Především s ohledem na možnosti a zkušenosti Katedry strojírenské technologie se k nalezení „map plasticity“ použila metodika zjišťování DMP pomocí vypínání připravených tvarových vzorků polokulovým tažníkem. Byly využity čtyři podmínky testování (**FP**, **FR**, **FR 13** a **FR 23**). Provedené měření nejenom určilo KMP pro každou podmínku měření, ale také potvrdilo výsledky naměřené ze statické zkoušky tahem. Opět se totiž neprokázal vliv velikosti předdeformace na výsledné vlastnosti materiálu TWIP 1200, ale také nebyl pozorován velký pokles oblastí použitelnosti při zvýšení rychlosti tažníku z $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4}$ m/s na $v_2 = 17,78$ m/s. Velmi důležitým výstupem jsou však opět naměřené snímky jednoho ze stavů přetvoření ($m_\phi = 1$)



znovu pomocí optického snímání deformace – tentokrát systémem **ARGUS**. Ukázaly, že s pomocí znalosti rozložení hlavní deformace po celém vrchlíku lze výhodně charakterizovat rozdíly v různých materiálech, které mohou v pravé části KMP výběrem elementů dosáhnout téměř stejných hodnot.

Naměřené hodnoty předurčují zkoumaný materiál pro **tvarově velmi členité výlisky**, které jsou podrobeny velkému přetvoření. Zároveň však (s ohledem na pevnostní hodnoty) plní také bezpečnostní funkci. Na druhou stranu je třeba vzít v úvahu, že se jedná o výsledky **laboratorního testování**, které se může velmi lišit od podmínek skutečného provozu. Veškeré výsledky disertační práce mohou sloužit jako vstupní data pro **numerické simulování** chování materiálu TWIP 1200. Je však zřejmé, že provedené měření vymezuje jenom velmi malou část k bližšímu pochopení chování tohoto materiálu. Je nutné si uvědomit, že provedené závěry v žádném případě neuzavírají popsání a pochopení charakteru průběhu tváření materiálu TWIP 1200. Jedná se spíše o prvotní snahu k položení základů ohledně tohoto materiálu. Otevírají nové, poměrně velmi široké okruhy dalších témat, které je potřeba v dalších letech podrobit dalšímu zkoumání.

Předem zmínění základních **doporučení pro další výzkum** je třeba zdůraznit, že celá tato disertační práce je zaměřena především na popsání a charakterizování tvářitelnosti nového a stále ještě spíše vyvíjeného materiálu, který se do značné míry odlišuje od známých a používaných materiálů. Hlavním úkolem bylo provést především určité seznámení se s testovaným materiálem TWIP 1200 a nalezení určitých „záchytných bodů“ pro další navazující výzkum. Během testování a navrhování postupů, jak přistupovat k testovanému materiálu a zjišťovat potřebné hodnoty různých veličin, se však objevilo velké množství otázek a možných dalších cest, které mohou vést k mnohem lepšímu poznání chování daného materiálu a je tedy vhodné alespoň některé z nich zmínit.

Celkové popsání tvářitelnosti jednoho materiálu zdaleka přesahuje rámec jedné práce. Z tohoto důvodu není v této práci věnována pozornost např. vlivu tloušťky, velikosti odpružení, vzniku a průběhu vlastního lomu apod.

Další výzkum v oblasti pochopení a charakterizování chování daného materiálu by měl ve velké míře směřovat do měření deformace pomocí optických metod. Již v této práci se ukázalo, že takovýto přístup dokáže odhalit jistá tajemství, které běžné testování nedokáže přiblížit. Vzhledem k zakoupení jednoho z takovýchto



systémů na Katedru strojírenské technologie bude jistě i naší velkou ambicí do budoucna široké využívání tohoto zařízení. Snahou by mělo být rozšířit měření např. na proces tažení výlisku karosářského typu a nebo sledovat proces měření DMP.

Jako velmi vhodné se ukazuje rozšíření zkoumání rozdílných TWIP materiálů o sledování vlivu chemického složení na následné plastické vlastnosti. V této práci byl testován pouze jeden TWIP materiál, ale škála možností, kterou s sebou přináší rozdílné chemické složení, znamená velmi širokou oblast dosažitelných mezí tohoto materiálu. Velký zájem by měl v budoucnu směřovat také do určování struktury pomocí metalografie. Získat v současné době snímky struktury tohoto materiálu je (vzhledem např. ke znalostem leptání materiálu) velmi obtížné. V neposlední řadě se ukazuje jako velmi důležité blíže poznat chování takového materiálu za různých zpracovatelských technologií (např. při bodovém svařování, které je velkou měrou zastoupeno především v automobilovém průmyslu).

Spolu s **cenou**, jenž je **cca 3x vyšší** než pro ostatní vysokopevnostní materiály, je značná neznalost v těchto oblastech v současné době velkou brzdou širší aplikace měřeného materiálu TWIP 1200 ve strojírenském průmyslu.

23. Seznam použité literatury

- [44] ASHBY, M.F.: Materials Selection in Mechanical Design, Pergamon Press, Oxford, 2005, ISBN 0-7506-6168-2
- [45] JÍRA, M.: Úspora hmotnosti automobilové karoserie použitím pevnostních plechů, Diplomová práce, TU v Liberci, Liberec 1998
- [46] PTÁČEK, L.: Nauka o materiálu I., CERM, Brno, 2001, ISBN 80-7204-193-2
- [47] PLÁNIČKA, F. – KULIŠ, Z.: Základy teorie plasticity, ČVUT, Praha, Vydavatelství ČVUT, 142 stran, 2004
- [48] POČTA, B.: Základy teorie tváření kovů, SNTL, Praha, 1966, 512 stran
- [49] BARRETT, CH.S.: Struktura kovů, Nakladatelství ČSAV, Praha, 1959, 660 stran
- [50] HERTZBERG R.W.: Deformation and fracture mechanics of engineering materials, John Wiley & Sons, New York, 1996, ISBN 0-471-01214-9
- [51] TALBERT, S.H. – AVITZUR, B.: Elementary Mechanics of Plastic Flow in Metal Forming, John Wiley & Sons, New York, 1996, ISBN 0-471-96003-9
- [52] PETRUŽELKA, J. – BŘEZINA, R.: Tvářitelnost kovových materiálů, VŠB, Ostrava, 2001
- [53] ALAXIN, J.: Fyzikální metalurgie I., skripta VŠST, Liberec, 1986
- [54] TMĚJ, J. – MIKEŠ, V. : Teorie tváření, skripta VŠST, Liberec, 1990, ISBN 80-7083-011-5
- [55] SMALLMAN, R.E.: Moderní nauka o kovech, SNTL, Praha, 1965, 320 stran
- [56] ALAXIN, J.: Fyzikální metalurgie II., skripta VŠST, Liberec, 1987



- [57] KIBEY, S. – LIU, J.B. – JOHNSON, D.D. – SEHITOGLU, H.: Predicting twinning stress in fcc metals: Linking twin-energy pathways to twin nucleation. In: Acta Materialia 55: Twinning, Internetový sborník, 6843-6851, 2007, www.sciencedirect.com
- [58] YANG, P. – XIE, Q. – MENG, L. – DING, H. – TANG, Z.: Dependence of deformation twinning on grain orientation in a high manganese steel. In: Scripta Materialia 55: Twinning, Internetový sborník, 629-631, 2006, www.sciencedirect.com
- [59] BOUAZIZ, O. – ALLAIN, S. – SCOTT, C.: Effect of grain and twin boundaries on the hardening mechanisms of twinning-induced plasticity steels. In: Scripta Materialia 58: Twinning, Internetový sborník, 484-487, 2007, www.sciencedirect.com
- [60] BARNETT, M.R.: Twinning and the ductility of magnesium alloys Part I: „Tension“ twins. In: Materials Science&Engineering A 464: Twinning, Internetový sborník, 1-7, 2007, www.sciencedirect.com
- [61] BARNETT, M.R.: Twinning and the ductility of magnesium alloys Part II: „Contraction“ twins. In: Materials Science&Engineering A 464: Twinning, Internetový sborník, 8-16, 2007, www.sciencedirect.com
- [62] ČSN – EN 10002-1: Kovové materiály, Zkouška tahem pro kovové materiály, 2004
- [63] VELES, P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov, SNTL, Praha, 1989
- [64] Aktualizace názvů a označování mechanických parametrů, Statická zkouška tahem, Norma, 2007
- [65] ČSN ISO 10275: Kovové materiály. Stanovení exponentu deformačního zpevnění plechů a pásů, 1995
- [66] ASTM E 646 – 78: Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-values) of Metallic Sheet Materials, 2000
- [67] MARCINIAK, Z. : Teorie tváření plechů, SNTL, Praha, 1964
- [68] SOLFRONK, P.: Vliv morfologie povrchu plechu na rozvoj deformace při tažení výlisků z plechu, Disertační práce, TU v Liberci, Liberec 2002
- [69] BUCHAR, Z.: Diagramy mezních přetvoření tenkých hlubokotažných plechů, Kandidátská disertační práce, TU v Liberci, Liberec 1987
- [70] DOUBEK, P.: Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace, Disertační práce, TU v Liberci, Liberec 2004
- [71] SOBOTKA, J.: Zhodnocení použití pevných a polotuhých mazadel v sériové výrobě při lisování výlisků karosářského typu, Diplomová práce, TU v Liberci, Liberec 2004
- [72] BILLY, J.: Trendy vývoja ocelových plechov pre ľahké automobilové konštrukcie, Hutnícké listy č.3, 1999, s. 16–21
- [73] RUMÍŠEK, P.: Plošné a objemové tváření (vícejazyčné názvosloví), skripta VUT, Brno, 2004
- [74] TSAKIRIS, V. – EDMONDS, D.V.: Martensite and deformation twinning in austenitic steels. In: Materials Science&Engineering A 273-275: Twinning, Internetový sborník, 430-436, 1999, www.sciencedirect.com
- [75] ALLAIN, S. - CHATEAU, J.-P. – BOUAZIZ, O.: A physical model of the twinning-induced plasticity effect in a high manganese austenitic steel. In: Materials Science&Engineering A 387-389: Twinning, Internetový sborník, 143-147, 2004, www.sciencedirect.com
- [76] BOUAZIZ, O. –GUELTON, N.: Modelling of TWIP effect on work-hardening. In: Materials Science&Engineering A 319-321: Twinning, Internetový sborník, 246-249, 2001, www.sciencedirect.com
- [77] CHEN, Z. – CAI, H. – Li, S. – ZHANG, X. – WANG, F. – TAN, CH.: Analysis of crystallographic twinning and slip in fcc crystals under plane strain compression. In: Materials Science&Engineering A 464: Twinning, Internetový sborník, 101-109, 2007, www.sciencedirect.com
- [78] MENG, L. - YANG, P. – XIE, Q. – – DING, H. – TANG, Z.: Dependence of deformation twinning on grain orientation in compressed high manganese steels. In: Scripta Materialia 56: Twinning, Internetový sborník, 931-934, 2007, www.sciencedirect.com
- [79] GRÄSSEL, O. – KRÜGER, L. – FROMMEYER, G. – MEYER, L.W.: High strength Fe-Mn-(Al,Si) TRIP/TWIP steels development-properties-application. In: International Journal of Plasticity 16: Twinning, Internetový sborník, 1391-1409, 2000, www.sciencedirect.com
- [80] Wikipedia: Mangan [07.02.2008]
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Mangan>>



- [81] ALLAIN, S. - CHATEAU, J.-P. – DAHMOUN, D. - BOUAZIZ, O.: Modeling of mechanical twinning in a high manganese content austenitic steel. In: Materials Science&Engineering A 378-389: Twinning, Internetový sborník, 272-276, 2004, www.sciencedirect.com
- [82] JANDOŠ, F. – ŘÍMAN, R. – GEMPERLE, A.: Využití moderních laboratorních metod v metalografii, SNTL, Praha, 1985
- [83] GOM: Optical Measuring Techniques ARAMIS, [17.08.2008]
<<http://www.gom.com/EN/measuring.systems/aramis/system/system.html>>
- [84] ČSN 01 0250: Statistické metody v průmyslové praxi. Všeobecné základy, 1973
- [85] GOM: Optical Measuring Techniques ARGUS, [17.08.2008]
<<http://www.gom.com/EN/measuring.systems/argus/system/system.html>>
- [86] NEKVINDA, M.: Matematika I., skripty TUL, Liberec, 1997, ISBN 80-7083-261-4

24. Publikační činnost

Publikace k zaměření disertační práce:

- [24] SOBOTKA, J.: Plastic Properties of TWIP Sheets. Sborník příspěvků. Mezinárodní Baťova doktorandská konference 2008, 12.4. 2008, Zlín, ISBN 978-80-7318-663-0 (CD ISBN 978-80-7318-664-7)
- [25] SOBOTKA, J.: Mechanical Properties of New High-Strength Materials. In: Sborník mezinárodní konference ERIN 2008, Bratislava, duben 2008, SR, ISBN 978-80-227-2849-2
- [26] SOBOTKA, J.: Evaluation of Mechanical Properties for TWIP Sheets. In: Sborník konference - METAL 2008, Hradec nad Moravicí, květen 2008, ČR, s.44, CD, ISBN 978-80-254-1987-8

Publikace za období 2007-2008:

- [27] SOBOTKA, J.: Evaluation of Fields of Temperature on Simple Stamping depending on Holding Pressure. ICTKI 2008, 23-25.1. 2008, UJEP Ústí nad Labem, Ústí nad Labem, ČR, s.216-217, CD, ISBN 978-80-7044-969-1
- [28] SOBOTKA, J.: Evaluation Using Hotmelt Lubricants by Series Production from the Tribological Point of View. 12.4. 2007, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, ČR, s. 262, CD, ISBN 978-80-7318-529-9
- [29] SOBOTKA J.: Evaluation of Using Drylubes and Semidrylubes Lubrication in Series Production Stamping of Car Body Mouldings. In: METAL 2007, 16. mezinárodní konference metalurgie a materiálů, 22-24.5. 2007, Hradec nad Moravicí : TANGER, spol. s.r.o., Ostrava, ČR, s. 50, ISBN 978-80-86840-33-8



- [30] SOBOTKA, J. - SOLFRONK, P. - KOLNEROVÁ, M. - DOUBEK, P.: Using Thermocamera for Observation Distribution of Temperature Fields by Forming. In: Technologia 2007, 19-20.9. 2007, Bratislava: Strojnická fakulta STU v Bratislave, SR, s.82, CD, ISBN 978-80-227-2712-9
- [31] SOBOTKA, J.: Observation of Deformation Speed Influence on Temperature Fields Distribution by Using Thermovision. In: TU Liberec – TU Dresden 2007, 5.9. 2007, ČR, Liberec: Fakulta strojní, CD, ISBN 978-80-7372-2498-4
- [32] DOUBEK, P. - SOLFRONK, P. – KOLNEROVÁ, M. - SOBOTKA, J.: Influence of loading speed on strenght of bonded joint. In: Technológia, 19.–20.9. 2007. Bratislava: STU v Bratislavě, 2007, SR, s.70 CD, ISBN 978-80-227-2712-9
- [33] DOUBEK, P. - KOLNEROVÁ, M. - SOLFRONK, P. - SOBOTKA, J.: Plastické vlastnosti vysokopevnostních materiálů dělené nestandardními technologiemi. In: 16. Mezinárodní konference METAL 2007, 22.-24.5. 2007. Hradec nad Moravicí, ČR, s.58-59 CD, ISBN 978-80-86840-33-8
- [34] KOLNEROVÁ, M. – SOBOTKA, J. - SOLFRONK, P. - DOUBEK, P.: Properties of metal sheets surface by manufacturing of car body stampings. In: 16. Mezinárodní konference METAL 2007, 22.-24.5. 2007, Hradec nad Moravicí, ČR, s. 10, Nb 166 ISBN 978-80-86840-33-8
- [35] KOLNEROVÁ, M. – SOBOTKA, J. - SOLFRONK, P. - DOUBEK, P.: Lubricants - their part and useability in stamping process. In: 10. Mezinárodní konference Technológia 2007, 19.-20.9. 2007, Bratislava : STU v Bratislavě. 2007, SR, s.75 CD, ISBN 978-80-227-2712-9
- [36] SOLFRONK, P.-SOBOTKA, J. -DOUBEK, P. - KOLNEROVÁ, M: Utilization of microphosphated sheets in automotive industry. In:16.Mezinárodní konference METAL 2007, 22.-24.5. 2007, Hradec nad Moravicí, ČR, s. 10, Nb 111 ISBN 978-80-86840-33-8
- [37] SOLFRONK, P.– SOBOTKA, J.- KOLNEROVÁ, M.- DOUBEK, P.: New type of protective coating for deep-drawing sheets using in automotive industry In: 10. Mezinárodní konference Technológia 2007, 19.-20.9. 2007, Bratislava : STU v Bratislavě. 2007, SR, s.82 CD. ISBN 978-80-227-2712-9

Publikace za rok 2005:

- [38] SOBOTKA, J.: Vyčerpání plastických vlastností při tažení výlisků z pevnostních plechů, XV. vědecké sympozium TU Liberec - TU Dresden, Liberec, ČR, 2005, 53 + CD, ISBN 80-7083-975-9
- [39] SOBOTKA, J.: Evaluation of using drylubes and semidrylubes lubrications in series production stamping of car body mouldings, Mezinárodní konference Juniormat '05, Brno, ČR, 2005, 335 - 338, ISBN 80-214-2984-4
- [40] SOBOTKA, J. – DOUBEK, P. – KOLNEROVÁ, M. – KOVÁRNÍK, L.: Stabilita procesu lisování s ohledem na použitý materiál, Forming 2005, Ostrava, ČR, 2005, 249 - 254, ISBN 80-248-0888-9
- [41] SOBOTKA, J. – DOUBEK, P. – KOLNEROVÁ, M. – KOVÁRNÍK, L.: Srovnání tribologických vlastností HDG a NIT plechů při použití maziv typu Hotmelt, Technológia 2005, Bratislava, SR, 2005, 105 + CD, ISBN 80-227-2264-2
- [42] KOVÁRNÍK, L. – SOBOTKA, J. – DOUBEK, P. – SOLFRONK, P.: Použití nelineárního modelu tření při simulaci tažení výlisku v PAM-STAMP 2G, Forming 2005, Ostrava, ČR, 2005, 129 - 132, ISBN 80-248-0888-9
- [43] KOVÁRNÍK, L. – SOBOTKA, J. – DOUBEK, P. – SOLFRONK, P.: Analýza rozložení deformace u výlisku z hlubokotažného plechu, Technológia 2005, Bratislava, SR, 2005, 101 + CD, ISBN 80-227-2264-2
- [44] KOVÁRNÍK, L. – SOBOTKA, J. – DOUBEK, P. – SOLFRONK, P.: Vliv použité metodiky měření na diagramy mezních přetvoření, Mezinárodní vědecká conference při příležitosti 55 let založení Fakulty strojní, Ostrava, ČR, 2005, 34 + CD, ISBN 80-248-0907-9
- [45] KOLNEROVÁ, M. – SOLFRONK, P. – SOBOTKA, J. – DOUBEK, P.: Vliv morfologie typu EBT na tribologické podmínky tažení, Forming 2005, Ostrava, ČR, 2005, 123 - 128, ISBN 80-248-0888-9
- [46] KOLNEROVÁ, M. – SOLFRONK, P. – SOBOTKA, J. – DOUBEK, P.: Vliv technologických parametrů na koeficient tření při tažení, Technológia 2005, Bratislava, SR, 2005, 100 + CD, ISBN 80-227-2264-2